

**APROVECHAMIENTO DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA PARA LA
GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES: DETECCIÓN DE ZONAS DE
AMENAZA POR SUBSIDENCIA EN EL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE
PEREIRA EN EL DEPARTAMENTO DE RISARALDA**



Juan José Restrepo Velásquez

Universidad Tecnológica de Pereira

Facultad de Ciencias Ambientales

Pereira, Colombia

2020

**APROVECHAMIENTO DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA PARA LA
GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES: DETECCIÓN DE ZONAS DE
AMENAZA POR SUBSIDENCIA EN EL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE
PEREIRA EN EL DEPARTAMENTO DE RISARALDA**

Por:

Juan José Restrepo Velásquez

Trabajo de investigación presentado como requisito para optar al título de:

Administrador Ambiental

Director:

M.Sc. Sistemas de Información Geográfica

Santiago Restrepo Calle

Universidad Tecnológica de Pereira

Facultad de Ciencias Ambientales

Pereira, Colombia

2020

***“Nuestros primeros esfuerzos son puramente instintivos,
incitaciones de una imaginación vívida e indisciplinada”***

Nikola Tesla

Resumen

El fenómeno de subsidencia consiste en el hundimiento de la superficie del terreno, los movimientos de la superficie del terreno pueden ir desde muy lentos hasta muy rápidos, son estos últimos los que tienen mayor capacidad de daño. Que pueden llegar a superar la capacidad de resiliencia de la sociedad, convirtiéndose en una amenaza de origen natural o antrópico según su tipología. Para el municipio de Pereira en el departamento de Risaralda se encuentran vacíos de información en la identificación y caracterización de este.

El objetivo general del trabajo de investigación es mejorar el conocimiento de la amenaza por fenómenos de subsidencia para el área urbana del municipio de Pereira, esto aprovechando nuevas técnicas para la toma y procesamiento de datos de campo para determinarlas.

A partir de la interferometría diferencial (DInSAR) y la técnica de dispersores permanentes en interferometría o PSI por sus siglas en inglés, los cuales calculados desde imágenes satelitales de radar (SAR) de los satélites Sentinel 1 & 2 del programa Copernicus de la ESA y procesadas en un modelo con una serie de entradas y procesos. Se calcularon los valores de desplazamiento del terreno en el área urbana en un periodo de 4 años (2016-2020) en velocidad y desplazamiento acumulado.

Estos dispersores permanentes en interferometría fueron validados mediante 2 métodos en los cuales mediante datos de campo de eventos asociados al fenómeno que se encuentran registrados en la sala de prensa de la alcaldía, fuente oficial municipal y aprovechando las ubicaciones de la red de monitoreo de pendientes y taludes inestables.

Representados los dispersores permanentes en un mapa que refleja la concentración de estos y las velocidades que fueron calculadas en una rampa de color, para el fácil entendimiento y lectura de este, para visibilizar las zonas que han venido teniendo una tendencia de hundimiento o elevación de la superficie.

Estos dispersores permanentes representados por puntos son una utilidad al convertirse en una herramienta que permite la toma de decisiones administrativas al ser incorporado en un instrumento de planificación.

En el municipio de Pereira, que cuenta con el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD), el cual comprende de 3 procesos principales los cuales son, conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo de desastres.

Una necesidad de la administración municipal se basa en el entendimiento de las dinámicas del territorio, para atender de la mejor manera las políticas públicas que en él se ejecuten.

La presente investigación pretende dar a conocer una utilidad de las imágenes satelitales, en este caso de los equipados con radar de apertura sintética (SAR) para la estimación de las zonas de subsidencia del municipio de Pereira en el departamento de Risaralda.

Palabras clave: Amenaza, Conocimiento, DInSAR, Interferometría, PSI, Riesgo, SAR, SIG, Subsidencia.

Abstract

The subsidence phenomenon consists of the sinking of the ground surface, the movements of the ground surface can go from very slow to very fast, it is these last ones that have greater capacity of damage. They can exceed the resilience capacity of society, becoming a threat of natural or anthropic origin depending on their type. For the municipality of Pereira in the department of Risaralda, there are gaps in information in the identification and characterization of this.

The general objective of the research work is to improve the knowledge of the threat of subsidence phenomena for the urban area of the municipality of Pereira, taking advantage of new techniques for the collection and processing of field data to determine them.

This will be done using new techniques for the collection and processing of field data to determine the threat of subsidence phenomena to the urban area of the municipality of Pereira. This will be done using differential interferometry (DInSAR) and the technique of permanent dispersers in interferometry or PSI, which are calculated from radar satellite images (SAR) from the ESA Copernicus program's Sentinel 1 & 2 satellites and processed in a model with a series of inputs and processes. Land displacement values were calculated in the urban area over a 4-year period (2016-2020) in terms of speed and accumulated displacement.

These permanent dispersers in interferometry were validated by 2 methods in which field data from events associated with the phenomenon were recorded in the mayor's press room, an official municipal source, and taking advantage of the locations of the slope and unstable slope monitoring network.

The permanent dispersers are represented on a map that reflects their concentration and the velocities that were calculated on a colored ramp, for easy understanding and reading, to make visible the areas that have been having a tendency to sink or rise from the surface.

These permanent dispersers represented by points are a useful tool that allows administrative decisions to be made when incorporated into a planning instrument.

In the municipality of Pereira, there is a Municipal Disaster Management Plan (PMGRD), which comprises three main processes: risk knowledge, risk reduction and disaster management.

A need of the municipal administration is based on the understanding of the dynamics of the territory, to better attend to the public policies implemented there.

The present investigation aims to show the usefulness of satellite images, in this case those equipped with synthetic aperture radar (SAR), for estimating the subsidence zones of the municipality of Pereira in the department of Risaralda.

Keywords: DInSAR, GIS, Interferometry, Knowledge, PSI, Risk, SAR, Threat, Subsidence.

Contenido

	Pág.
1. Introducción.....	12
2. Objetivos	14
3. Marco teórico conceptual	15
3.1 Geográfico	15
3.2 Normativo.....	16
3.3 Riesgo de desastres y fenómeno de subsidencia	17
3.4 Teledetección & sensores remotos	22
3.4.1 Tipos de sensores remotos.....	23
3.5 Principios básicos de radar & radar de apertura sintética.....	24
3.6 Interferometría SAR (InSAR).....	27
3.6.1 DInSAR.....	29
3.6.2 Persistent Scatterer Interferometry (PSI)	31
4. Metodología.....	32
5. Resultados	36
5.1 Preprocesamiento de imágenes SAR	36
5.2 Procesamiento de imágenes SAR.....	48
5.3 Posprocesamiento de imágenes SAR.....	52
5.4 Generación de mapa de amenaza por fenómeno de subsidencia.....	66
5.5 Análisis de datos por comuna	68
5.6 Análisis de datos por barrios.....	72
5.7 Análisis de datos en llenos antrópicos.....	74
5.8 Estrategia de adaptación de zonas de subsidencia en PMGRD de Pereira.....	78
6. Discusión de resultados.....	80
6.1 Análisis de preprocesamiento de imágenes SAR	80
6.2 Análisis de procesamiento de imágenes SAR.....	82
6.3 Análisis de posprocesamiento de imágenes SAR.....	83
7. Conclusiones y recomendaciones	85
7.1 Conclusiones.....	85
7.2 Recomendaciones	88
8. Bibliografía.....	89

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 Mapa ubicación zona de estudio	15
Figura 2 Tipos de sensores a bordo de satélites de observación de la Tierra	23
Figura 3 Sistema de satélite SAR	25
Figura 4 Retrodispersión de la señal en diferentes superficies.	26
Figura 5 Sistema de satélite InSAR.	27
Figura 6 Combinación de imágenes SAR para producir un interferograma.....	28
Figura 7 Combinación PSI de imágenes SAR para producir los interferogramas.	31
Figura 8 Momentos del modelo.	32
Figura 9 Modelo para la detección de subsidencia.....	33
Figura 10 Quick Look imagen SAR 2016 01 07.....	38
Figura 11 Imagen maestra & imágenes esclavas.....	39
Figura 12 DEM SRTM	40
Figura 13 Coherencia promedio.....	41
Figura 14 Datos atmosféricos	43
Figura 15 Puntos esparcidos para fase atmosférica	44
Figura 16 Conexiones para fase atmosférica	44
Figura 17 Punto de control en tierra	45
Figura 18 Histograma coherencia.....	48
Figura 19 Puntos esparcidos para PSI.....	48
Figura 20 Velocidad de desplazamiento de los PS.....	49
Figura 21 Máscara del área urbana.....	50
Figura 22 PS en área urbana	51
Figura 24 Mapa de zonas subsidencia área urbana.....	67
Figura 25 Mapa de subsidencia por comuna	70
Figura 26 Medida de posición central mediana por comuna	71
Figura 27 Mapa de subsidencia por barrio	73
Figura 28 Gráfico de velocidad mediana de PS sobre llenos antrópicos	74
Figura 30 Mapa de PS & llenos antrópicos	77

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 Características de los métodos topográficos clásicos.	20
Tabla 2 Características de los métodos geodésicos.	21
Tabla 3 Características de los métodos fotogramétricos.	21
Tabla 4 Características de los métodos de teledetección.....	22
Tabla 5 Resumen de imágenes SAR seleccionadas.....	36
Tabla 6 Imágenes SAR adquiridas.	37
Tabla 7 Imágenes de retardo troposférico.....	46
Tabla 8 Interferogramas.....	47
Tabla 9 Caso 1.....	53
Tabla 10 Caso 2.....	54
Tabla 11 Caso 3.....	55
Tabla 12 Caso 4.....	56
Tabla 13 Caso 5.....	57
Tabla 14 Estación Bosques de Cantabria.....	59
Tabla 15 Estación Vendedores Ambulantes.....	60
Tabla 16 Estación Villa Santana.....	61
Tabla 17 Estación Albania.....	62
Tabla 18 Estación El Jardín.....	63
Tabla 19 Estación Portal de la Villa.....	64
Tabla 20 Estación Portal de las Mercedes.....	65
Tabla 21 Datos estadísticos, análisis por comuna.....	68
Tabla 22 Datos de velocidad mediana de PS sobre llenos antrópicos.....	74
Tabla 23 Datos de velocidad mediana de PS fuera de llenos antrópicos.....	75
Tabla 24 Pruebas de PS aleatorios fuera de llenos antrópicos.....	76

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>CD</i>	Conocimiento del Riesgo
<i>DEM</i>	<i>Digital Elevation Model</i> (Modelo de Elevación Digital)
<i>DIGER</i>	Dirección de Gestión del Riesgo
<i>DInSAR</i>	<i>Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar</i> (Interferometría Diferencial Radar de Apertura Sintética)
<i>GPS</i>	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamiento Global)
<i>LOS</i>	<i>Line of Sight</i> (Linea de vision)
<i>MD</i>	Manejo de Desastres
<i>MDT</i>	Modelo digital de terreno
PMGRD	Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres
<i>PS</i>	<i>Persistent Scatterer</i> (Dispersores permanentes)
<i>PSI</i>	<i>Persistent Scatterer Interferometry</i> (Dispersores permanentes en interferometría)
<i>RR</i>	Reducción del Riesgo
<i>SAR</i>	<i>Synthetic Aperture Radar</i> (Radar de Apertura Sintética)
<i>SIG</i>	Sistemas de Información Geográfica
<i>SLC</i>	<i>Single-Look Complex</i>

1. Introducción

El **riesgo** de desastres se entiende como una función entre amenaza, exposición y vulnerabilidad, según el Congreso de la República de Colombia (2012) define; la **amenaza** como el peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera no intencional, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.

La **subsistencia** consiste en el hundimiento generalizado del terreno. Los movimientos masivos de subsidencia se dan desde muy lentos a rápidos y pueden estar relacionados con diversas causas naturales o antrópicas, entre las cuales se encuentran las formaciones solubles o kársticas y la explotación de aguas subterráneas o causas antrópicas como los llenos, canalizaciones o cloacas que pueden llegar a ocasionar grandes daños a la infraestructura física que reposa sobre el terreno y a la población que se encuentre expuesta a este fenómeno.

Por lo anterior se hace necesario el **conocimiento del riesgo** frente a la amenaza por el fenómeno de subsidencia, dicho conocimiento compuesto por diferentes procesos como, primero la identificación de escenarios de riesgo, el análisis y evaluación del riesgo, el monitoreo y seguimiento del riesgo y sus componentes y la comunicación para promover una mayor conciencia de este, que da paso a los procesos de reducción del riesgo y de manejo de desastres.

Tradicionalmente el fenómeno de subsidencia se evalúa con métodos in-situ, es decir, desde el lugar de la superficie del terreno que se va a analizar, con aparatos tradicionales para la toma de medidas de altura sobre el nivel del mar u otro punto de referencia, como lo son los altímetros, GPS, aparatos de medición topográficos entre otros, los cuales por la naturaleza de la toma de muestra y el constante desplazamiento de profesionales a ellas, quedan cortos a la hora de analizar grandes extensiones del terreno.

Los satélites provistos con sistema de radar de apertura sintética y sus siglas en inglés **SAR**, este es un tipo especial de radar que permite obtener imágenes de alta resolución a larga distancia, por ejemplo, desde el espacio. Los radares utilizan microondas para medir distancias (alcance), Al contrario que los altímetros, que apuntan al nadir (punto situado debajo, en la vertical), los sistemas SAR envían pulsos lateralmente.

Gracias a la oblicuidad en la toma de datos, el radar puede devolver al sensor las señales de los distintos objetos de la Tierra en diferentes momentos, lo que permite discriminarlos. Cada píxel en una imagen de radar representa el coeficiente de retrodispersión (σ) de esa área sobre el terreno. El coeficiente de retrodispersión (σ) implica una mayor complejidad porque depende de muchos factores como la rugosidad del terreno, la geometría del terreno (pendiente y orientación al ángulo de incidencia del haz), el ángulo de incidencia del haz y la polarización de la observación.

El SAR tiene ventajas únicas sobre sensores ópticos ya que es independiente de la iluminación solar, penetra nubes, y en cierta medida pocos centímetros de superficies como suelo, vegetación, nieve, dependiendo de la frecuencia a la que operan. No obstante, en imágenes de radar se debe considerar la complejidad en el procesamiento de los datos y las dificultades en su interpretación SARMAP (2009).

La Interferometría diferencial (DInSAR) tiene como objetivo medir la deformación del suelo usando pares repetidos de interferometría. Hay varias formas de crear un interferograma diferencial. El método de dos-pases usa un modelo de elevación digital (DEM) para convertir las coordenadas de radar a geográficas, escalado usando la línea de base, y la extracción desde el interferograma Massonnet & Feigl (1998).

Con el aprovechamiento de esta tecnología se logró primero la obtención de imágenes SAR del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea ESA y sus satélites Sentinel 1A & Sentinel 1B, el debido procesamiento de estas con el método de DInSAR y la técnica Persistent Scatterer Interferometry (PSI) para terminar con la elaboración de un mapa con puntos que indican la velocidad de desplazamiento vertical de la superficie del terreno en el área urbana del municipio de Pereira en el departamento de Risaralda, los cuales fueron validados con datos y eventos de campo y valores de coherencia acordes a los criterios de procesamiento, los cuales aportan información necesaria sobre las zonas donde se presenta el fenómeno de subsidencia.

Los resultados obtenidos aportan información de localización y velocidad de desplazamiento vertical de la superficie del terreno en el área urbana del municipio de Pereira en el departamento de Risaralda, con una alta información representada por una densidad de puntos que proveen a la interpretación del territorio desde las dinámicas de asentamientos urbanos, la aplicación de la técnica en áreas de posibles expansiones urbanas, teniendo en cuenta la naturaleza del origen del fenómeno en las zonas con altas velocidades de desplazamiento, para una mejor gestión pública desde el conocimiento del fenómeno de subsidencia en el territorio.

2. Objetivos

Objetivo General

Mejorar el conocimiento de la amenaza por fenómenos de subsidencia para el área urbana del municipio de Pereira.

Objetivos Específicos

- Seleccionar y adaptar un modelo para la detección de subsidencia para las condiciones del área de estudio.
- Ejecutar el modelo para la comparación de los interferogramas para el periodo comprendido entre 2016-2019 para el área de estudio.
- Comprobar la aplicabilidad de los resultados del modelo mediante la corroboración con datos de campo.
- Proponer una estrategia para incluir las zonas de amenaza por subsidencia en el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD) de Pereira, Risaralda.

Fuente: Elaboración propia

Limita al Sur, con los municipios de Ulloa (Departamento del Valle), Filandia y Salento (Departamento del Quindío). Al Oriente, con el Departamento del Tolima, con Anzoategui, Santa Isabel, Ibagué y zona de los nevados. Al Occidente, con los municipios de Cartago, Anserma Nuevo (Departamento del Valle), Balboa, La Virginia (Departamento de Risaralda).

La extensión geográfica municipal de Pereira es de 702 km² y se encuentra a una altura promedio de 1.411 msnm y cuenta con una temperatura promedio de 21°C. (Alcaldía de Pereira 2018)

La zona urbana de la Ciudad de Pereira con una extensión de 3.040,18 Ha (Plan de Ordenamiento Territorial (POT) Acuerdo 35 de 2016), “se sitúa sobre colinas alargadas en sentido este – oeste, con una profunda incisión de corrientes de agua que, o bien drenan de la cordillera, como el río Otún, o se han formado al interior del abanico, como el río Consota y la mayoría de las quebradas y drenajes urbanos.” (Vásquez 2018)

3.2 Normativo

Colombia adoptó la política nacional de gestión del riesgo de desastres mediante la Ley 1523 en el año 2012; en la cual se define los objetivos, programas, acciones, responsables y presupuestos; esta política está alineada con las cuatro prioridades suscritas al marco de Sendai 2015-2030 para la reducción del riesgo de Desastres.

El instrumento adoptado por la política nacional de gestión del riesgo de desastres es el Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres de Colombia (PNGRD) "Una estrategia de desarrollo" 2015 - 2030, donde se establecieron tres procesos fundamentales que son el conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo de desastres. Dentro del conocimiento del riesgo en el cual se enmarca el presente trabajo, están los subprocesos, Identificación y caracterización de escenarios de riesgo, Análisis y evaluación del riesgo, Monitoreo del riesgo y comunicación del riesgo, que se incorporara en el componente programático del Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD), como parte de su primer objetivo "Conocimiento del riesgo" establece prioridades de Reducción de Riesgo (RR) y manejo de desastres (MD) en el municipio de Pereira en el departamento de Risaralda.

Existen vacíos en información o conocimiento referentes a la caracterización de diversos riesgos en el municipio de Pereira en el departamento de Risaralda, tal como lo expone el documento publicado por la Dirección de Gestión de Riesgo (DIGER), titulado "Estado del arte de los estudios de gestión del riesgo de desastres del municipio de Pereira" -2019- donde hacen importante alusión a lo relacionado con los riesgos antrópicos no intencionales, señalando que "se pueden evidenciar

necesidades en la caracterización detallada del escenario de riesgo antrópico por diversos tipos de amenaza. No se encontraron zonificaciones espaciales y/o categorizaciones por comuna o sector en donde se indiquen las condiciones de riesgo antrópico por lo menos, las fuentes geo-espacializadas de amenaza en el área urbana."

Además de lo anterior y respecto con el fenómeno de subsidencia, la DIGER publica el informe titulado "Prioridades de la gestión del riesgo de desastres del municipio de Pereira" 2019, donde señalan "Identificar y caracterizar zonas de riesgo por subsidencia en el área urbana."

3.3 Riesgo de desastres y fenómeno de subsidencia

Los asentamientos humanos y los procesos de ocupación territorial a lo largo de la historia han ido evolucionando, es así como remontándose a la prehistoria las comunidades existentes ocupaban espacios físicos en busca de protección a diversas amenazas como, las condiciones climáticas o depredadores, se data de uso de las cuevas como los lugares de residencia. Las necesidades básicas de alimentación hacían que aquellas comunidades se movieran a otras zonas donde abundaran los recursos que ya no se encontraban donde habían ocupado por temporadas, al estar en constante movimiento se les denominó nómadas, hasta el presente en la edad contemporánea donde las comunidades son sedentarias y el urbanismo concentra la mayor parte de los pobladores de los territorios en espacios físicos altamente densificados.

Las transformaciones que se dan en un territorio que es ocupado por una sociedad traen consigo alteraciones físicas en él, en su mayoría, siendo a mayor densificación urbana, mayor la degradación de los recursos ambientales y los procesos naturales.

En un territorio con condiciones de alteración en los recursos ambientales y los procesos naturales, traen consigo escenarios de riesgo de desastre, el concepto de riesgo de desastres tomado y adaptado de Lavell (2003), Narváez et al (2009) y la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Colombia (Ley 1523 de 2012) entendido como una función entre la amenaza que son eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural tecnológico, biosanitario o humano no intencional, y la vulnerabilidad de los elementos expuestos que es la fragilidad o susceptibilidad de ser afectados, en un tiempo y lugar determinado. Con el impacto y efectos que superan la capacidad de resiliencia de la sociedad afectada.

Haciendo referencia a los factores del riesgo de desastre, según Narváez et al (2009), “a la existencia de condiciones físicas y sociales que contribuyen a la existencia de riesgo en la sociedad y que se diferencian entre sí. Además, se constituyen en factores de riesgo a raíz de relaciones y secuencias de causa y efecto, diferenciadas”. Donde expresa que el riesgo de desastres impacta a la sociedad que se encuentra expuesta a recibir un impacto y debido a su posibilidad de ser propensos a sufrir algún impacto por algún evento físico con capacidad suficiente de hacer daño.

La amenaza está definida en la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Colombia (Ley 1523 de 2012) como “Peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.”

En este sentido, la vulnerabilidad representa las características internas de los elementos expuestos frente a las amenazas, de acuerdo con Wilches Chaux (1993) “la vulnerabilidad en sí misma constituye un sistema dinámico, es decir, que surge como consecuencia de la interacción de una serie de factores y características (internas y externas) que convergen en una comunidad particular. El resultado de esa interacción es el “bloqueo” o incapacidad de la comunidad para responder adecuadamente ante la presencia de un riesgo determinado.” Correspondiendo a los elementos expuestos que pueden ser, individuos, comunidades, asentamientos, infraestructura, entre otros, a su predisposición a ser afectado o de ser susceptible a sufrir un daño.

Así mismo como los procesos de asentamientos humanos y de ocupación territorial han ido evolucionando, estos están estrechamente ligados a condiciones de riesgo de desastres, quienes a su vez incrementan en la misma medida.

En este sentido surgen condiciones de riesgo frente a diferentes amenazas, el fenómeno de subsidencia ha sido poco analizado debido a su complejidad, las velocidades en que este se manifiesta, generalmente en largos periodos de tiempo, con grandes efectos dañinos en la infraestructura urbana y la población expuesta.

Para entender el fenómeno de subsidencia tomando las características de este, relacionando el concepto que ha evolucionado en el tiempo.

Así como lo dice Prokopovich (1979) “La subsidencia del terreno es únicamente la manifestación en superficie de una serie de mecanismos Sub-superficiales de deformación.” Uno de los primeros autores de la actualidad que expone procesos internos en el terreno y que se evidencian en la superficie.

La subsidencia es según Pacheco (2007) “El fenómeno que tiene lugar debido a la extracción de sólidos (minerales) o fluidos (gas, petróleo, vapor, agua, etc.) del subsuelo, que se manifiesta en hundimientos paulatinos o súbitos de la superficie y en la generación de Agrietamientos en la masa del suelo.” Donde las acciones humanas referentes a extracción y aprovechamiento del subsuelo tienen la capacidad de provocar cambios en la altura de la superficie, así mismo este movimiento se da en forma vertical.

Cómo lo expone Carvajal (2008) “En geología e ingeniería: subsidencia describe el movimiento de una superficie (usualmente, la superficie de la Tierra) Generalmente movimiento vertical (Elevación y Hundimiento) respecto al nivel del mar.” Este tipo de movimientos podría llegar a tener un alto impacto negativo en la infraestructura que se ubique sobre la superficie que esta se encuentre.

En este sentido como lo explica Roberto Tomás (2009) “La subsidencia del terreno es un fenómeno que consistente en el hundimiento de la superficie terrestre cuyo origen puede deberse a diversas causas generando cuantiosos daños en aquellas infraestructuras que se asientan sobre ella.” Este tipo de movimientos en una escala temporal podrían llegar a pasar desapercibidos.

Para Tessitore (2014) “La subsidencia es un riesgo natural usualmente caracterizado por lentos movimientos de tierra, por esta razón rara vez se convierte en peligro para la vida humana. Sin embargo, esto puede tener varias áreas de interés sobre unos periodos de tiempo, causando deformaciones que pueden variar de unos pocos milímetros a varios metros. Por lo tanto, si esto afecta áreas metropolitanas puede causar importantes daños estructurales e infraestructurales con altos costos consecuentes.”

En términos generales el fenómeno de subsidencia es el efecto de cambio de altura ya sea hundimiento o elevación de la superficie con respecto a un punto de referencia generando una deformación en el terreno y topografía, este movimiento puede causado por múltiples procesos que se dan en el subsuelo ya sean de origen natural o antrópico.

El cambio de altura puede ir desde lento a rápido dependiendo de la velocidad de desplazamiento dada por las características físicas del suelo y subsuelo y/o la velocidad de la alteración de este por una causa antrópica o procesos naturales. Con la capacidad de generar daños, convirtiéndose en un escenario de riesgo que podría pasar desapercibido.

- **Métodos de medición de la subsidencia**

Topográficos convencionales: Como su nombre lo indica es la forma clásica de realizar las mediciones por métodos topográficos para determinar el desplazamiento de la superficie en un periodo de tiempo, dichos métodos se enfocan en los cambios de posición de los puntos de control que presenten movimientos en los ejes X, Y y Z con respecto a las bases topográficas con coordenadas conocidas, Según Delgado (2003) “Los métodos topográficos pueden clasificarse en dos grandes grupos: altimétricos y planimétricos. Otro método utilizado en el estudio de fenómenos de subsidencia es el de medición de distancias reales, cuya finalidad es determinar la variación de la distancia existente entre el punto de control y la base de referencia.” Las principales características de las técnicas empleadas se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1 Características de los métodos topográficos clásicos.

Método	Uso	Resultados	Rango	Precisión
Nivelación trigonométrica o por pendientes	Variación de la altitud	dZ	Variable	20 mm
Nivelación geométrica o por alturas	Variación de la altitud	dZ	Variable	± 1 mm/Km
Nivelación geométrica de precisión	Variación de la altitud	dZ	Variable	± 0.1 mm/Km
Triangulación topográfica	Desplazamiento de blancos móviles	dX, dY, dZ	< 300-1000 m	5-10 mm
Itinerario topográfico (Poligonal)	Desplazamiento de blancos móviles	dX, dY, dZ	Variable	5-10 mm
Distanciómetro electroóptico (MED)	Desplazamiento de blancos móviles	dD	1-10 Km	7 mm \pm 1-5

Fuente: Delgado (2003)

Geodésicos: Por medio de puntos de control y el uso de los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), trabajando con los datos de altura sobre nivel del mar, y posición en el plano X & Y, en un periodo de tiempo definido para hallar la diferencia en la distancia de los puntos, Según Márquez (2009) “Para la aplicación de este método es obligatorio tener un punto geodésico con coordenadas referidas a un elipsoide y su correspondiente altura al nivel

medio del mar, de esta forma mediante un simple posicionamiento estático en la estación remota o el punto al cual se le quiere realizar la nivelación se determinan la altura.” Las principales características de las técnicas empleadas se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2 Características de los métodos geodésicos.

Método	Uso	Resultados	Rango	Precisión
Convencional Global Positioning System (CGPS)	Desplazamiento de blancos móviles	dX, dY, dZ		1-2 mm
Differential Global Positioning System (DGPS)	Desplazamiento de blancos móviles	dX, dY, dZ	Baseline < 20 Km	1 mm
Determination d'Orbites et Radio-Positionnement Intégrés par Satellite (DORIS)	Desplazamiento de blancos móviles	dX, dY, dZ	Variable	2 mm
Telemetría de láser por satélite (SRL)	Desplazamiento de blancos móviles	dX, dY, dZ	Variable	<1 cm

Fuente: Delgado (2003)

Fotogramétricos: Según Temba (2000) “Este método se basa en la primicia de que la fotogrametría es una técnica que nos permite obtener las coordenadas o los valores en tres dimensiones de una escena a partir de pares de fotografías.” las fotografías terrestres, aéreas o satelitales pueden ser utilizadas dependiendo el área que se vaya a analizar, permiten desarrollar los modelos digitales de terreno (MDT) que, analizados en un intervalo de tiempo, son comparados y analizados para obtener los cambios en la superficie de la zona. Las principales características de las técnicas empleadas se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3 Características de los métodos fotogramétricos.

Método	Uso	Resultados	Rango	Precisión
Fotogrametría terrestre	Desplazamiento de blancos móviles	dX, dY, dZ	<200 m	±40 mm
Fotogrametría aérea	Desplazamiento de blancos móviles	dX, dY, dZ	H _{vuelo} < 500 m	±100 mm
Fotogrametrías satélite	Desplazamiento de blancos móviles	dX, dY, dZ		±15 m

Fuente: Delgado (2003)

Teledetección: Según la ESA (2009) “La teledetección es un modo de obtener información acerca de objetos tomando y analizando datos sin que los instrumentos empleados para adquirir los datos estén en contacto directo con el objeto.” se divide en dos grupos, radar y laser, la información que se obtiene de esta es procesada y analizada por cada par de

adquisiciones para obtener las diferencias de la superficie de la zona. Las principales características de las técnicas empleadas se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4 Características de los métodos de teledetección.

Método	Uso	Resultados	Rango	Precisión
Interferometría diferencial SAR convencional (DInSAR)	Desplazamientos en la Línea de Vista (Line of Sight)	dX, dY, dZ	Baseline \leq 200 m Coherencia >0.3 en varios puntos adyacentes	3-5 mm
Permanent Scatterers (PS)	Desplazamientos en la Línea de Vista (Line of Sight)	dX, dY, dZ	Coherencia >0.7 en un solo punto N.º de imágenes >30	1 mm
Stable Coherent Pixels (SCP)	Desplazamientos en la Línea de Vista (Line of Sight)	dX, dY, dZ	Coherencia >0.4 en un solo punto	1 mm
Ground Based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR)	Desplazamientos en la Línea de Vista (Line of Sight)	dX, dY, dZ	<1.5 Km	<1 mm
Terrestrial Laser Scanner (TLS) o Ground-based Laser Scanner (GB-LS)	Superposición de MDT	dX, dY, dZ	<400 m	± 1.5 mm (hasta 50 m)
Airborne Laser Scanner (ALS), Light Detection and Ranging (LIDAR) o Airborne Laser Terrain Mapper (ALTM)	Superposición de MDT	dX, dY, dZ	$200 < H_{\text{vuelo}} < 6000$ m Distancia base <50 Km	150-200 mm

Fuente: Delgado (2003)

3.4 Teledetección & sensores remotos

La teledetección está enfocada a la observación remota de la superficie, esta es posible gracias a los sistemas de sensores remotos, según Chuvieco (1995), la teledetección espacial está definida como “aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en las plataformas espaciales, estamos suponiendo que entre la Tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, ya por emisión propia.”

Los sensores remotos son todos aquellos instrumentos que en conjunto son utilizados para obtener información desde una distancia lejana, es decir, sin estar en contacto con el objeto a analizar, en la teledetección y según lo define Schowengerdt (1997) como “la medición de las propiedades de los objetos en la superficie terrestre utilizando datos adquiridos de aviones y satélites. Por lo tanto, es un intento de medir algo a distancia, en lugar de in situ. Como no estamos en contacto directo con el objeto de interés, debemos confiar en señales propagadas de algún tipo, por ejemplo, ópticas, acústicas o de microondas.”

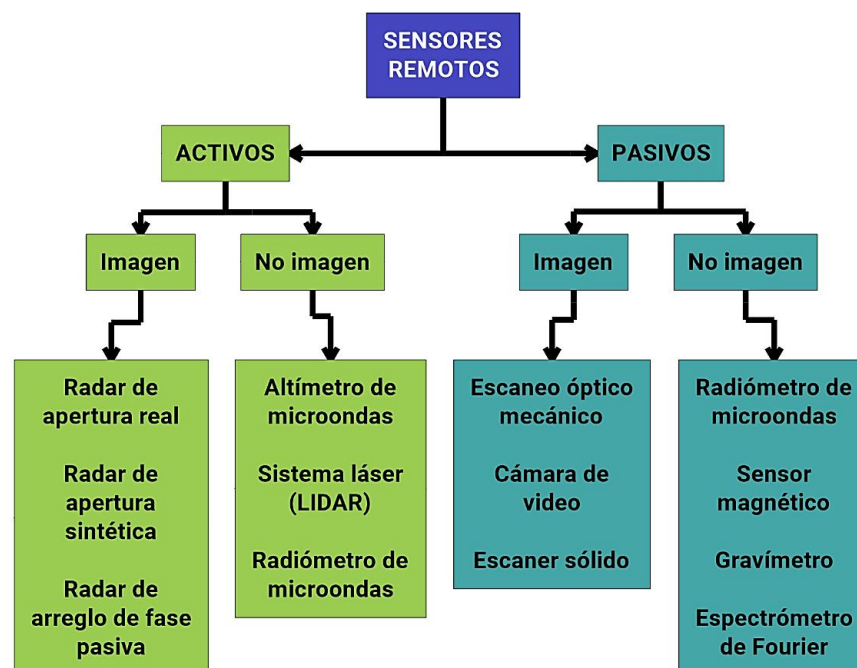
3.4.1 Tipos de sensores remotos.

Entre la amplia diversidad de sensores remotos que son utilizados para distintos tipos de observación de la superficie de la tierra, se pueden diferenciar dos tipos de detección que dependiendo de las características de emisión y/o recepción de señales.

Según Maini & Agrawal (2007) Se clasifican en sensores remotos pasivos que “son los cuales detectan la radiación que es emitida o reflejada por los objetos bajo observación. Usualmente, la fuente de radiación más común medida por esta clase de sensores es la luz solar reflejada. Entre los ejemplos de sensores remotos pasivos se incluyen los sistemas de escaneo óptico-mecánicos y los radiómetros, entre otros. Y los sensores remotos activos son “los encargados de emitir energía con el propósito de escanear los objetos para posteriormente medir la radiación que es reflejada o retrodispersada desde el objetivo. La tecnología de radar es un ejemplo de un sensor remoto activo, la cual mide el retraso en el tiempo entre la emisión y el retorno de la señal, estableciendo de esta forma la localización, altura, velocidad y dirección del objeto.”

Entre los ejemplos que se encuentran de sensores remotos según su tipo se aprecian en la figura 2.

Figura 2 Tipos de sensores a bordo de satélites de observación de la Tierra



Fuente: Adaptado de Maini & Agrawal (2007)

3.5 Principios básicos de radar & radar de apertura sintética

Según Skolnik, (1990) “El concepto básico de radar es relativamente simple, aunque en muchos casos su implementación práctica no lo es. Un radar funciona irradiando energía electromagnética y detectando el eco devuelto por los objetos reflectantes (objetivos). La naturaleza de la señal de eco proporciona información sobre el objetivo. El alcance o la distancia al objetivo se determina a partir del tiempo que le toma a la energía radiada viajar al objetivo y regresar.” Esta característica de ser un sensor remoto con capacidad de emitir energía en forma de microondas con posibilidad de operar en el día o en la noche, minimizando las obstrucciones de las condiciones atmosféricas (nubosidad), diferenciar los distintos tipos de superficie y medir la distancia del sensor y objeto reflectante.

El radar de apertura sintética es un radar de tipo activo el cual emite energía en el intervalo de frecuencias de microondas en un corto periodo de tiempo y recibe los ecos provenientes de reflexiones de la señal en los objetos dando lugar a una apertura sintética, hecho que ocurre debido a la gran velocidad de desplazamiento del vehículo espacial sobre la órbita que se encuentre.

Platonov (2002) describe qué “El blanco permanece durante unos instantes en el haz de la antena y es observado por el radar desde numerosos puntos a lo largo de la trayectoria de satélite, lo que es equivalente a prolongar la longitud real de la antena.”

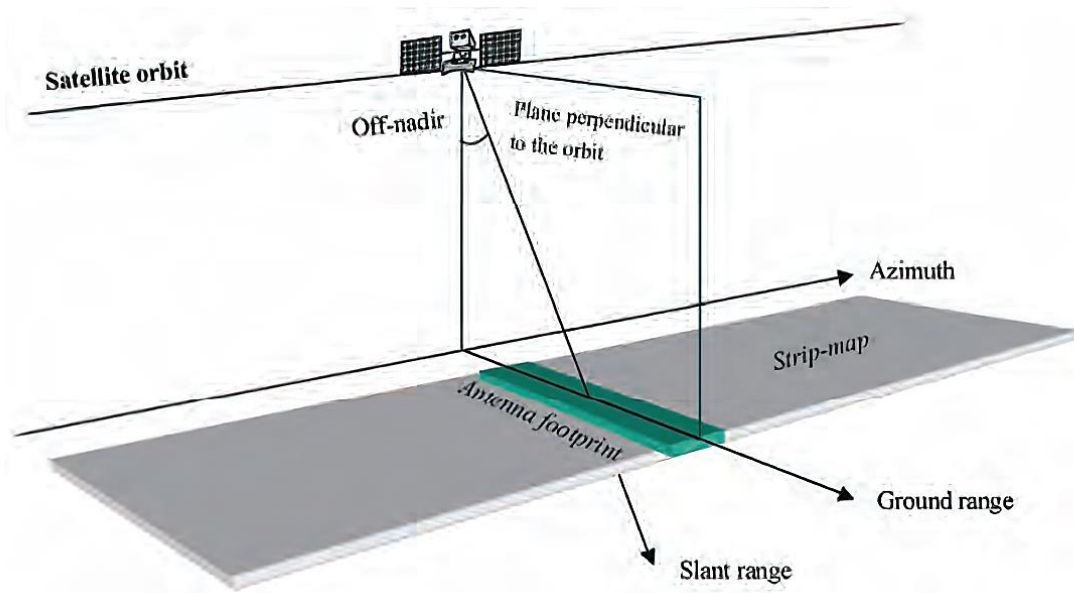
Como lo describen Ferretti, Monti-Guarnieri, Prati & Rocca, (2007) “La dirección a lo largo del Line of Sight (LOS) (Línea de visión) generalmente se denomina slant-range (dirección de rango inclinado).” La geometría original de los datos SAR, corresponde a un rango inclinado, donde los datos son proyectados desde este a un ground range (rango terrestre).

Los datos SAR proyectados al rango terrestre, tampoco se encuentran referenciados a un sistema cartográfico, por lo que no cuentan con una corrección geométrica, por esta razón la única manera de geo codificar de manera correcta los datos SAR, es mediante la aplicación de un enfoque riguroso del doppler aprovechando los datos SAR, con su geometría en rango inclinado original (SARMAP, 2009)

La resolución de las imágenes SAR está determinada por el tamaño de la antena, la duración del pulso, y la extensión del haz (SARMAP, 2009). La resolución de las imágenes SAR está dada por 2 medidas, las cuales son rango y azimuth.

La figura 3 ilustra las geometrías en la que los satélites SAR orbitan y toman las imágenes sobre la superficie

Figura 3 Sistema de satélite SAR



Fuente: Ferretti et al. (2007)

La interpretación de las imágenes de origen SAR se ve afectado por diferentes causas naturales del sistema de sensor remoto, ocasionados en primer lugar la distorsión de la imagen debido al ángulo de incidencia oblicuo.

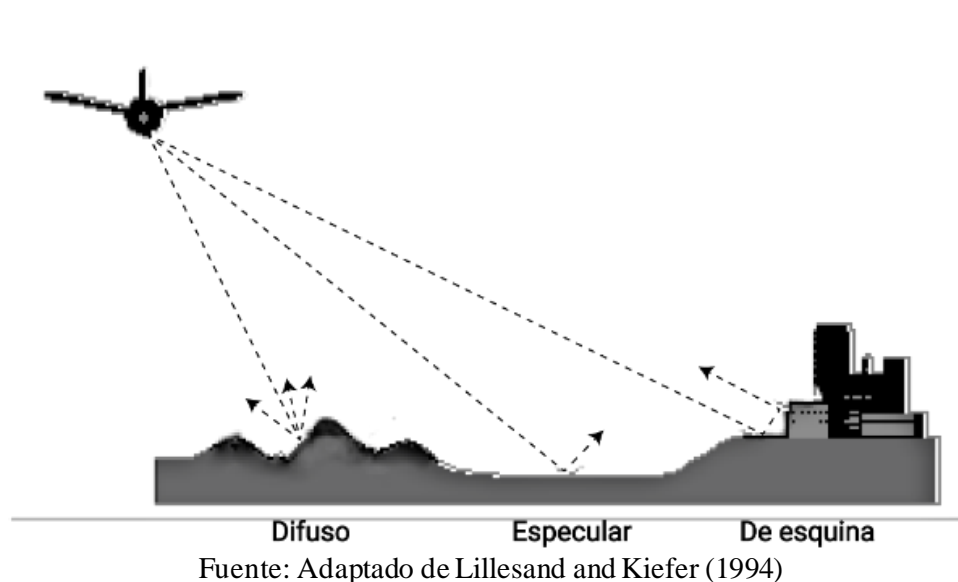
Según Skolnik (1990) “El movimiento subsecuente provee un escaneo a lo largo de la trayectoria de vuelo en dirección azimutal, de esta manera el haz del radar es dirigido hacia los lados y hacia debajo de la superficie, generalmente en dirección perpendicular a la trayectoria usando un ángulo esquinado”, ya que el sensor mide el “eco” de la distancia del punto al sensor; y segundo el efecto Speckle o moteado.

Dicho por Ferretti et al. (2007) “la presencia de varios dispersores dentro de cada celda de resolución SAR genera el efecto llamado “Speckle” que es común a todos los sistemas de imágenes coherentes. El moteado está presente en SAR, pero no en imágenes ópticas.” Además, se generan problemas por el movimiento relativo de la escena observada, a razón del movimiento de rotación de la Tierra y movimiento de la escena respecto a la Tierra.

Según Ferretti et al. (2007) “La imagen SAR detectada contiene una medida de la amplitud de la radiación retrodispersada hacia el radar por los objetos (dispersores) contenido en cada celda de resolución SAR. Esta amplitud depende más de la aspereza que en la composición química de los dispersores en el terreno.” Es así como, dependiendo de la forma de la superficie en la que la señal se dispersa el valor de amplitud se puede diferenciar entre diferentes tipos de objetos, las rocas expuestas y las áreas urbanas muestran altas amplitudes, mientras que las superficies planas lisas como agua, muestran amplitudes bajas, ya que la radiación se refleja principalmente fuera del radar.

En la figura 4 se aprecia la forma de retrodispersión en varios objetos.

Figura 4 Retrodispersión de la señal en diferentes superficies.



- Retrodispersión, es necesario tener en cuenta el término físico de reflexión, en el cual Lekner (1987) indica que “la reflexión es el cambio de dirección de una onda, que, al entrar en contacto con la superficie de separación entre dos medios cambiantes, regresa al medio donde se originó.”

Reflexión difusa, cuando un rayo de luz incide sobre una superficie "no pulida", los rayos no se reflejan en ninguna dirección, es decir se difunden.

Reflexión especular se produce cuando un rayo de luz incide sobre una superficie pulida (espejo) y cambia su dirección sin cambiar el medio por donde se propaga.

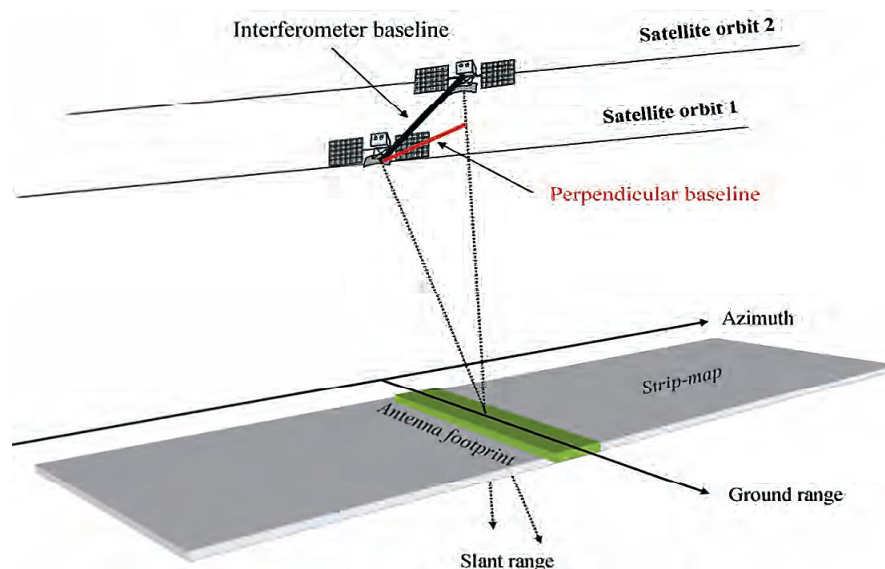
Retroreflexión o reflexión de esquina, la capacidad que tienen algunas superficies que por su estructura pueden reflejar la luz de vuelta hacia la fuente, sin que importe el ángulo de incidencia original.

3.6 Interferometría SAR (InSAR)

Ferretti et. al (2007) dice qué “La amplitud del interferograma es la amplitud de la primera imagen multiplicada por la de la segunda, mientras que su fase (la fase interferométrica) es la diferencia de fase entre las imágenes.” Como lo aclara Bamler (1998), Massonnet (1998), Franceschetti (1999), Rosen (2000) Citado por Ferretti et al. (2007) “El interferograma SAR se genera por multiplicación cruzada, píxel por píxel, la primera imagen SAR con el complejo conjugado de la segunda imagen.”

La generación del interferograma se puede hacer de dos formas diferentes, según la forma de adquisición de las imágenes y como lo describe Ferreti et. al (2007) “Un satélite SAR puede observar la misma área desde ángulos de mirada ligeramente diferentes. Esto se puede hacer simultáneamente (con dos radares montados en la misma plataforma) o en diferentes momentos aprovechando órbitas repetidas del mismo satélite.” La figura 5 ilustra las geometrías de los satélites para las adquisiciones de las imágenes SAR en la que se aprovecha las orbitas del pase, la diferencia entre los pases, según Ferreti et. al (2007) La distancia entre los dos satélites (o órbitas) en el plano perpendicular a la órbita se llama baseline (línea de base) del interferograma.

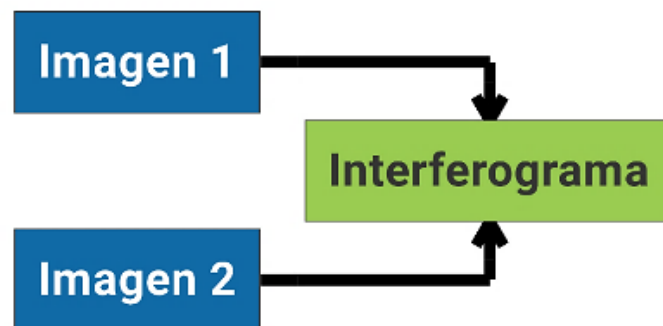
Figura 5 Sistema de satélite InSAR.



Fuente: Ferretti et al. (2007)

La técnica InSAR permite realizar la medición sobre las imágenes en formato Single-Look Complex (SLC) las cuales contienen los datos de la amplitud y la fase de la señal de retorno de la superficie. la técnica InSAR combina dos imágenes de SAR para producir un interferograma de radar, tal como se observa en la figura 6, el resultado revela información sobre la elevación del área de interés entre dos adquisiciones de imágenes.

Figura 6 Combinación de imágenes SAR para producir un interferograma.



Fuente: Elaboración propia.

Los datos de fase obtenidos a partir de la interferometría son las distancias entre el satélite y la superficie del terreno, calculados mediante la medición de tiempos y desfases.

Sillerico (2010) Estas diferencias de fase están en función de la distancia y pueden ser debidas básicamente a dos motivos: en primer lugar, a la diferencia de posición entre las dos trayectorias del satélite y, en segundo lugar, a un desplazamiento de la zona observada entre las dos adquisiciones, que puede ser causado por varios fenómenos, como, por ejemplo, un terremoto o una subsidencia del terreno. De esta forma, Martínez (2005) “la interferometría SAR (InSAR) es una técnica que permite la detección de movimientos y deformaciones de la superficie terrestre”

La señal reflejada se ve afectada por varios parámetros como son la atmósfera, el ruido y los movimientos en la superficie. En el caso de movimientos o deformaciones en la superficie, la metodología de cálculo es la siguiente: se tiene un punto P que se ha desplazado a un punto P' durante

el tiempo entre una adquisición y la otra. De esta forma la fase interferométrica (F_{int}) se ve afectada por varios parámetros, según se presenta en la siguiente ecuación:

$$\phi_{Int} = \phi_S - \phi_M$$

$$\phi_{Int} = \frac{SP - MP}{\frac{\lambda}{4 \cdot \pi}} + \frac{SP' - MP}{\frac{\lambda}{4 \cdot \pi}} + \phi_{Atm} + \phi_{Ruido}$$

$$\phi_{Int} = \phi_{Topo} + \phi_{Mov} + \phi_{Atm} + \phi_{Ruido}$$

Donde:

F_S y F_M son las fases interferométricas de la posición del satélite esclavo y maestro,

F_{Atm} es la contribución de la atmósfera,

F_{Ruido} componente debida al ruido,

F_{Topo} componente debida a la topografía del terreno,

F_{Mov} componente debida al movimiento o deformación,

SP es la distancia del satélite esclavo al punto, siendo P' el punto desplazado,

MP es la distancia del satélite maestro al punto &

λ es la longitud de onda radar.

3.6.1 DInSAR

La interferometría SAR diferencial (D-InSAR), es una variante de InSAR así lo aclaran Zhilin, Zou, Ding, Chen & Liu (2004) “Se trata de una técnica de proceso de imagen que permite la generación de mapas de desplazamiento del terreno y el cálculo de la coherencia relativa, a partir de n pasos del sensor SAR por una misma zona de estudio.” Es decir, qué los resultados de los procesos de los pares de imágenes para lograr los interferogramas se pueden convertir en una herramienta para analizar los comportamientos de los movimientos en un área a analizar detectando los cambios en la fase interferométrica en las zonas de alta coherencia relativa.

Como lo explica Hanssen (2001) “DInSAR, como técnica general, incluye métodos desde interferometría de un solo par, hasta enfoques más avanzados. Sin embargo, lo que tienen en común es que explotan la información contenida en la fase interferométrica calculada como la diferencia de fase entre dos imágenes adquiridas en dos momentos diferentes desde casi la misma posición del satélite.”

Para determinar la diferencia de fase (ΔF) se utiliza la siguiente formula:

$$\Delta F = \Delta F_{flat} + \Delta F_{Topo} + \Delta F_{Mov} + \Delta F_{Atm} + \Delta F_{Ruido}$$

Donde:

ΔF_{flat} es la contribución de fase de la tierra plana,

ΔF_{Topo} representa la topografía,

ΔF_{Mov} es la parte de la fase que representa la deformación del suelo medida a lo largo de la línea de visión (LOS),

ΔF_{Atm} es la contribución de la fase causada por el retraso de la propagación de las ondas de radar a través de la atmósfera &

ΔF_{Ruido} es ruido residual.

La conversión de fases sin envolver a valores de desplazamiento, referencialmente en una dirección vertical en lugar de una dirección de línea de visión (LOS), se realiza de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\text{Desplazamiento Vertical} = (F_{unw} \cdot \lambda) / (-4\pi (\cos \theta_{inc}))$$

Donde:

F_{unw} es la fase sin envolver,

λ es la longitud de onda del radar &

θ_{inc} es el ángulo de incidencia.

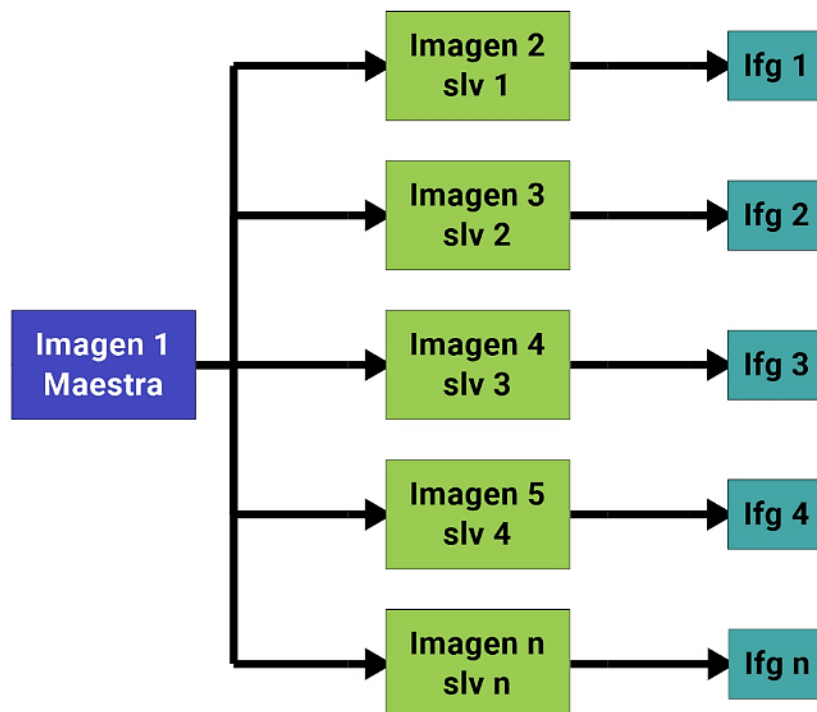
3.6.2 Persistent Scatterer Interferometry (PSI)

Con la técnica PSI, se procesan los píxeles coherentes con fase o amplitud estable, el objetivo es la identificación de píxeles coherentes únicos, llamados Permanent Scatterers (PS), a partir de interferogramas de la combinación de varias imágenes SAR separadas por grandes líneas de base.

ESA (2007) “La velocidad constante relativa se estima como la pendiente de la línea que mejor se ajusta a la fase diferencial en función del tiempo.” Es decir que el valor del desplazamiento vertical de los PS se analiza individualmente y después de la combinación de las imágenes tal como se muestra en la figura 7, donde, a partir de una imagen maestra se hace la combinación con las demás imágenes que se denominan esclavas y se obtienen los respectivos interferogramas.

El número de PS resultantes es bastante bajo en áreas con cobertura vegetal, debido a la baja coherencia que hay, mientras que en áreas urbanas el número de PS es relativamente alto por los valores de coherencia que son altos.

Figura 7 Combinación PSI de imágenes SAR para producir los interferogramas.



Fuente: Elaboración propia.

4. Metodología

Para el desarrollo de la detección de subsidencias en el área urbana del municipio de Pereira, se elaboró un modelo el cual está comprendido por 3 momentos, como se observa en la figura 8.

Dichos momentos se diferencian cada uno de acuerdo con su fin, los cuales son, primero, el preprocesamiento, donde se obtienen y se alistan las imágenes SAR. Segundo, el procesamiento, donde utilizando la técnica InSAR se combinan cada par de imágenes SAR para obtener los interferogramas. Tercero el posprocesamiento, finalizando con la estimación geoestadística para el cálculo de velocidades de cada punto, la validación con datos de campo y la elaboración del mapa final de zonas de subsidencia.

El modelo está representado en un diagrama de flujo como con las convenciones que se muestran en la figura 9, el cual contiene, las entradas necesarias, los procesos y la salida que es el producto terminado.

Figura 8 Momentos del modelo.

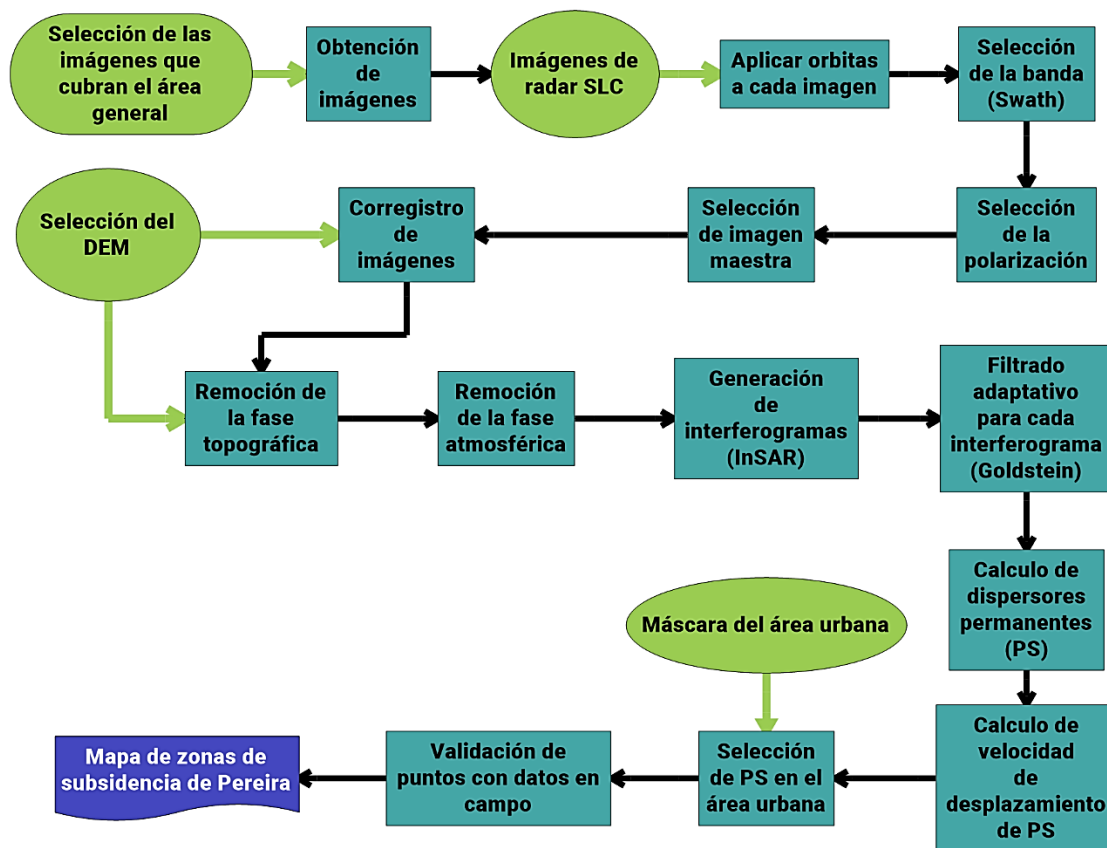


Fuente: Elaboración propia



Convenciones utilizadas en el modelo.

Figura 9 Modelo para la detección de subsidencia.



Fuente: Elaboración propia

Los procesos de los momentos del modelo se describen a continuación:

Obtención de imágenes: Donde se adquieren las imágenes SAR desde una plataforma que las alberga, se decide las fechas de adquisición o toma de la imagen, la forma de adquisición, la cantidad de imágenes, la dirección del recorrido del satélite y la banda de estas.

Aplicar órbitas a cada imagen: Donde se agregan a los metadatos de telemetría de cada imagen las órbitas precisas de acuerdo con el pase del satélite y se sustituyen las órbitas predichas.

Selección de la banda (Swath): Donde se elige la banda *Swat* de acuerdo con que corresponda al área de estudio.

Selección de la polarización: Donde se elige la polarización de acuerdo con las necesidades y la disposición en el total de las imágenes.

Selección de imagen maestra: Donde se elige la imagen con la cual se generan los interferogramas a partir de la combinación de imágenes.

Corregistro de imágenes: Donde se combinan las imágenes y se calcula la correlación de los píxeles que las componen haciendo el uso del DEM elegido para mejorar la precisión y posicionamiento de estas.

Remoción de la fase topográfica: Donde se corrigen los cambios de la topografía del terreno y la curvatura de la tierra con respecto al DEM elegido y se hacen las correcciones de altura de las imágenes.

Remoción de la fase atmosférica: Donde se corrigen los valores de amplitud de las imágenes SAR que han sido afectados por las condiciones meteorológicas, se calculan y se eliminan.

Generación de interferogramas (InSAR): Donde se forman los interferogramas de acuerdo con la multiplicación cruzada píxel por píxel de la imagen maestra con el resto de las imágenes denominadas esclavas, representado los valores de la amplitud como la multiplicación de ambas imágenes y la fase interferométrica se representa como la diferencia de fase entre las dos imágenes.

Filtrado adaptativo para cada interferograma: Donde se reduce el ruido (*Spekle*) o conocido como “sal y pimienta” en el que, según Goldstein & Werner (1998) “El cual reduce el ruido de la fase interferométrica y de esta forma se mejora la precisión de fase”.

Cálculo de dispersores permanentes (PS): Donde se calculan los dispersores permanentes presentes en la superposición de la totalidad de interferogramas, dichos dispersores son los píxeles que tienen valores mayores o iguales a los que correspondan de acuerdo con las condiciones propias de cada sitio de estudio, tomando los valores de coherencia de los píxeles resultantes del corregistro de imágenes.

Cálculo de velocidad de desplazamiento de PS: Donde se calcula el desplazamiento de cada dispersor permanente (PS), con respecto a un punto estable del sitio, el cálculo de velocidad se realiza con las tendencias lineales de los valores de la fase interferométrica de cada píxel por píxel que corresponden a la superposición del total de interferogramas, este valor de tendencia lineal sirve para estimar las delta de altura de cada PS y determinar los valores máximos y mínimos de velocidad de desplazamiento con respecto al punto estable durante el tiempo de adquisición de las imágenes.

Selección de PS en el área urbana: Donde se seleccionan los dispersores permanentes (PS) del área concreta del territorio que se analiza, los dispersores permanentes (PS) representados por puntos en el plano con los valores de desplazamiento con respecto a la imagen maestra y sirven para calcular los valores de velocidad de desplazamiento, desplazamiento acumulado en el tiempo total de las adquisiciones de las imágenes totales.

Validación de puntos con datos de campo: Donde a través de fuentes de información se verifica que los datos obtenidos del proceso sean acordes a la realidad de los procesos y fenómenos del área en concreto a analizar, que los valores finales obtenidos reflejen de manera adecuada los efectos de eventos registrados en las zonas y sean coherentes frente a estos.

Elaboración de mapa de zonas de subsidencia de Pereira: Donde se evidencia los resultados del modelo por medio de los elementos que componen el mapa, los dispersores permanentes (PS) representados por medio de puntos de colores que indican la velocidad de desplazamiento vertical en velocidad, el área de estudio delimitada por los perímetros pertinentes y un sistema de coordenadas para ubicar el lugar y las zonas donde se presentan los desplazamientos de la superficie del terreno.

5. Resultados

5.1 Preprocesamiento de imágenes SAR

Selección de las imágenes que cubran el área general.

La selección de las imágenes SAR a utilizar se hizo de acuerdo con las siguientes condiciones, la primera, que cumplieran con el formato SLC, segundo, contar con la polarización VV, forma de adquisición *Interferometric Wide Swath Mode* (IW), tercero imágenes capturadas en los tiempos más secos para minimizar los efectos de la fase troposférica, los meses elegidos comprenden entre diciembre-febrero y junio-agosto.

El resumen de las imágenes seleccionadas se encuentra en la tabla 5.

Tabla 5 Resumen de imágenes SAR seleccionadas.

Fuente de adquisición	ESA
Fechas de adquisición	07 enero 2016 – 04 enero 2020
Cantidad de imágenes	25
Dirección	Ascendente
Banda	C
Cantidad de imágenes por Satélite	5 Sentinel-1A, 20 Sentinel-1B
Cantidad de imágenes Polarización VV	5
Cantidad de imágenes Polarización VV, VH	20

Fuente: Elaboración propia

Obtención de imágenes

La gran mayoría de los datos, información y servicios entregados por la infraestructura de *Copernicus Space* están disponibles y accesibles para cualquier ciudadano y cualquier organización en todo el mundo de forma gratuita, completa y de acceso abierto, las imágenes seleccionadas corresponden al pase del satélite y la captura de la zona de estudio, la fecha de la toma y se muestran en la tabla 6.

Tabla 6 Imágenes SAR adquiridas.

Nombre Archivo	Fecha
S1A_IW_SLC__1SSV_20160107T232148_20160107T232215_009395_00D9AB_B8E1	2016 01 07
S1A_IW_SLC__1SSV_20160224T232147_20160224T232214_010095_00EE0D_DC27	2016 02 24
S1A_IW_SLC__1SSV_20160530T232151_20160530T232218_011495_011869_2D8C	2016 05 30
S1A_IW_SLC__1SSV_20160717T232154_20160717T232221_012195_012EC4_DE46	2016 07 17
S1A_IW_SLC__1SSV_20160810T232155_20160810T232222_012545_013A4D_BFE0	2016 08 10
S1B_IW_SLC__1SDV_20161214T232114_20161214T232141_003399_005CE4_DBF1	2016 12 14
S1B_IW_SLC__1SDV_20170131T232111_20170131T232138_004099_00716B_8A74	2017 01 31
S1B_IW_SLC__1SDV_20170224T232111_20170224T232138_004449_007BE1_C524	2017 02 24
S1B_IW_SLC__1SDV_20170612T232117_20170612T232144_006024_00A92F_DC66	2017 06 12
S1B_IW_SLC__1SDV_20170706T232118_20170706T232145_006374_00B339_360D	2017 07 06
S1B_IW_SLC__1SDV_20170823T232121_20170823T232148_007074_00C766_B70D	2017 08 23
S1B_IW_SLC__1SDV_20171221T232121_20171221T232148_008824_00FB6A_6829	2017 12 21
S1B_IW_SLC__1SDV_20180126T232120_20180126T232147_009349_010C82_5DC5	2018 01 26
S1B_IW_SLC__1SDV_20180207T232120_20180207T232147_009524_011244_FA18	2018 02 07
S1B_IW_SLC__1SDV_20180607T232123_20180607T232150_011274_014B15_A3D0	2018 06 07
S1B_IW_SLC__1SDV_20180701T232125_20180701T232152_011624_0155EE_6A10	2018 07 01
S1B_IW_SLC__1SDV_20180713T232125_20180713T232152_011799_015B59_D62A	2018 07 13
S1B_IW_SLC__1SDV_20181216T232128_20181216T232155_014074_01A21B_8504	2018 12 16
S1B_IW_SLC__1SDV_20190121T232127_20190121T232154_014599_01B337_B34D	2019 01 21
S1B_IW_SLC__1SDV_20190214T232126_20190214T232153_014949_01BE94_FA33	2019 02 14
S1B_IW_SLC__1SDV_20190614T232130_20190614T232157_016699_01F6D2_7DA6	2019 06 14
S1B_IW_SLC__1SDV_20190801T232133_20190801T232200_017399_020B80_6536	2019 08 01
S1B_IW_SLC__1SDV_20190825T232134_20190825T232201_017749_021657_9D5F	2019 08 25
S1B_IW_SLC__1SDV_20191211T232135_20191211T232202_019324_0247D6_6625	2019 12 11
S1B_IW_SLC__1SDV_20200104T232134_20200104T232201_019674_0252F6_CB98	2020 01 04

Fuente: Elaboración propia

*S1A: Sentinel 1A, S1B:

Sentinel 1B

Se hizo el uso del software compilado **SARproZ**© by PeriZ *with the authorized license.key file* para Windows Desde el proceso de aplicar órbitas, hasta el proceso de cálculo de velocidad de los PS.

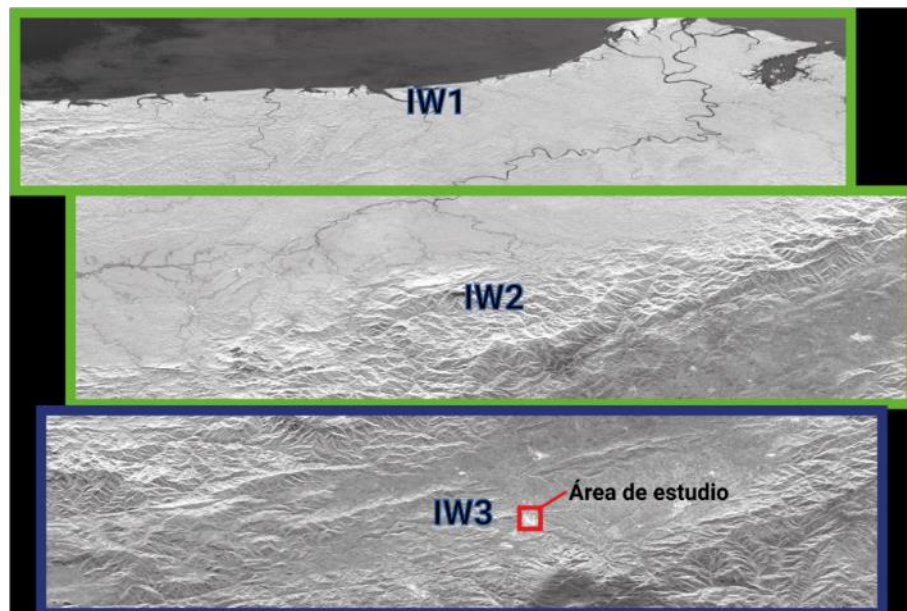
Aplicar órbitas a cada imagen

Los datos auxiliares de órbita contienen información sobre la posición del satélite durante la adquisición de datos SAR, el formato de los archivos de órbita se encuentran en *Precise Orbit Ephemerides* (POE), estos archivos sirven para precisar los datos de telemetría de todo el recorrido del satélite los cuales se agregan a los metadatos de las imágenes que antes contenía los datos de órbitas predichas del satélite.

Selección de la banda (Swath)

Para la selección de la banda Swath, se eligió la IW3 que es donde se sitúa el área de estudio como se observa en la figura 10, cabe resaltar que la imagen está georreferenciada en slant-range y no está orientada al norte geográfico además la imagen se encuentra en la línea de visión del satélite (LOS).

Figura 10 Quick Look imagen SAR 2016 01 07.



Fuente: Elaboración propia

Selección de la polarización

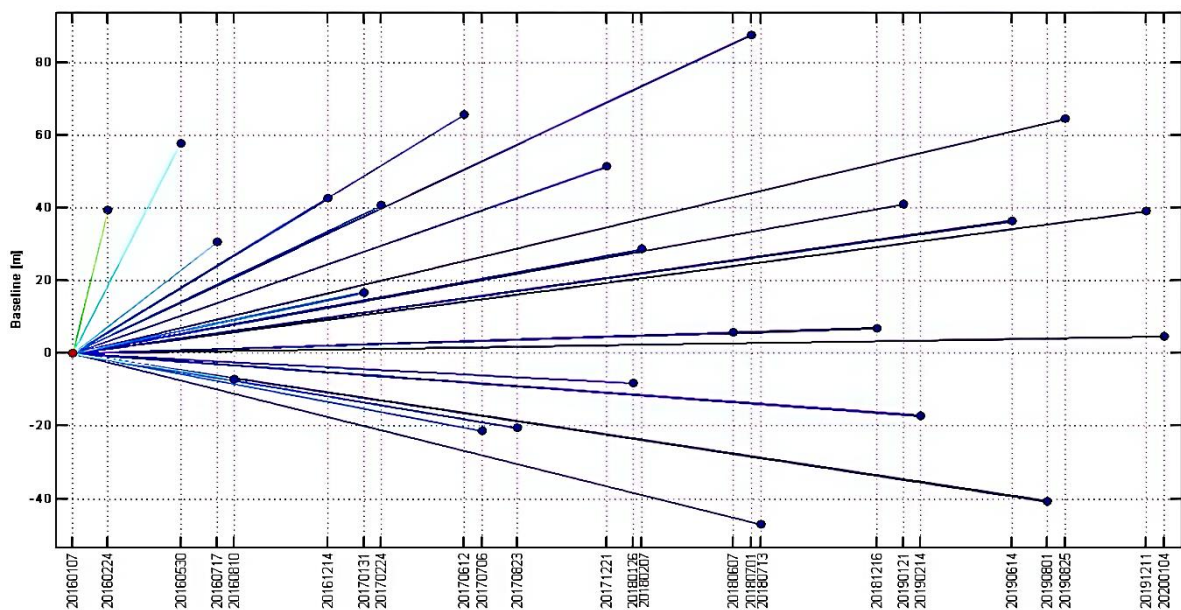
El SAR funciona considerando la polaridad de la señal electromagnética que emite y las propiedades de polarización de la señal que capta al retorno. Una onda polarizada horizontalmente (H) o verticalmente (V) al incidir sobre un objetivo produce otra onda de retorno que puede tener aportaciones en ambas polarizaciones H y V.

La selección de la polarización de las imágenes fue la VV, solo 4/5 partes de las imágenes cuentan con doble polarización VV, VH, mientras que el total de imágenes seleccionadas para este trabajo cuentan con la polarización VV.

Selección de imagen maestra

Se eligió como imagen maestra la imagen más antigua, la cual corresponde con la fecha de adquisición del día 07 de Ene de 2016 tomada por el satélite S1A, a su vez se define la imagen más cercana en tiempo de adquisición como esclava 1, la siguiente como esclava 2 y así consecutivamente como se muestra en la figura 11.

Figura 11 Imagen maestra & imágenes esclavas

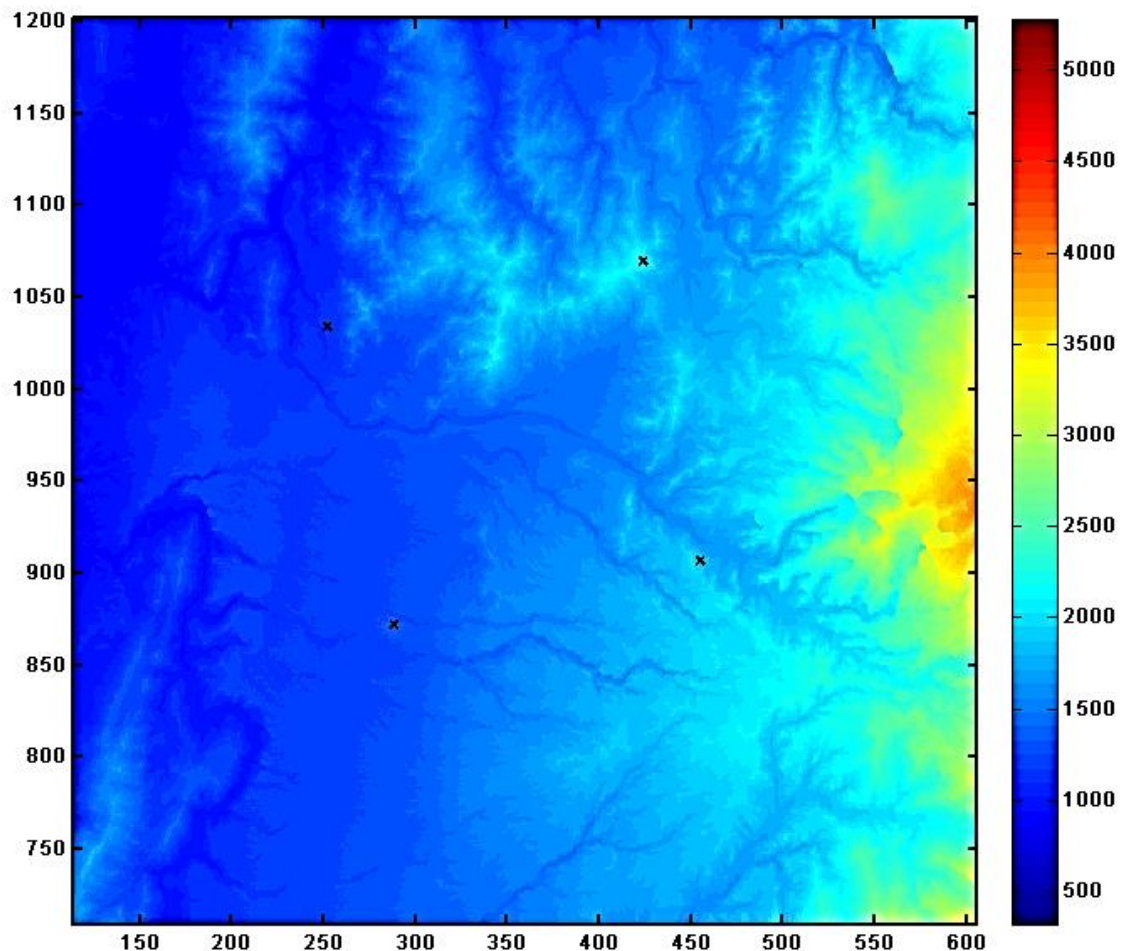


Fuente: Elaboración propia

Selección del DEM

Para el desarrollo de la detección de la subsidencia en el área urbana de Pereira se hizo necesario la selección de un DEM, el cual fue el SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) el cual recoge datos topográficos de todo el mundo, tiene como objetivo servir como base o fuente de datos de alta resolución a nivel global de datos topográficos del planeta. Este es un proyecto internacional liderado por la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA) y la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) (Ramírez, 2017). El DEM seleccionado se muestra en la figura 12 las “x” representan el área de estudio la rampa de colores representa la altura en msnm.

Figura 12 DEM SRTM

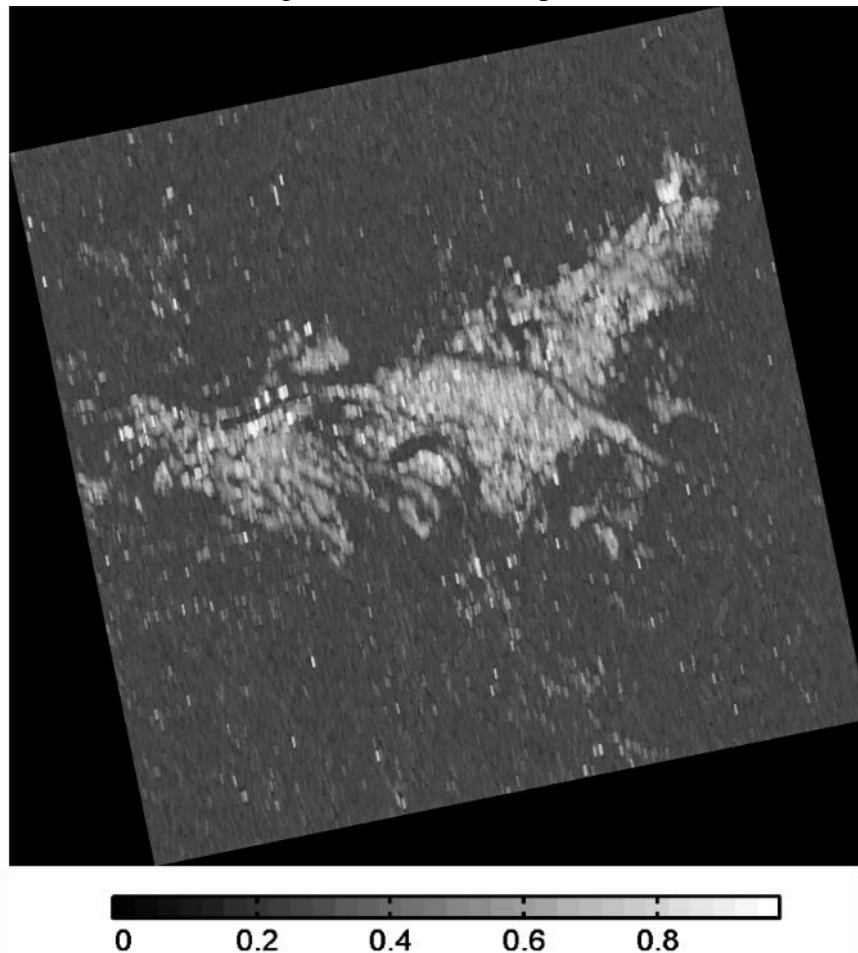


Fuente: Elaboración propia

Corregistro de imágenes

Para llevar a cabo el proceso de interferometría, es necesario que entre cada par de imágenes haya una coincidencia de píxel a píxel, la alineación de las imágenes SAR se logró a través del corregistro de las mismas, imagen maestra con imagen esclava, para la optimización de la correlación se hace el uso del DEM SRTM para mejorar el proceso y evitar errores de posicionamiento, como resultado se obtuvo una coherencia relativa promedio la cual se observa en la figura 13, que refleja la coincidencia de la amplitud de la señal retrodispersada en el total de las imágenes maestra y esclavas en una escala de 0 a 1

Figura 13 Coherencia promedio



Fuente: Elaboración propia

Remoción de la fase topográfica

La remoción de la fase topográfica se hizo en función de los cambios de fase en la topografía del área, en la fase topográfica existen los valores de fase que corresponde a la curvatura de la tierra, los cuales pueden ser confundidos con los valores de diferencia de fase obtenidos al final del proceso.

Se hizo el uso del DEM SRTM, el cual es codificado a los sistemas de coordenadas de las imágenes de radar y restado de la fase topográfica de los interferogramas, el DEM se codifica por radar a los sistemas de coordenadas de la imagen maestra (valor real) y junto con la fase de referencia calculada. Al finalizar, la fase de referencia se interpola a la grilla entera de las coordenadas maestras y esto se resta del interferograma complejo (European Space Agency, 2018).

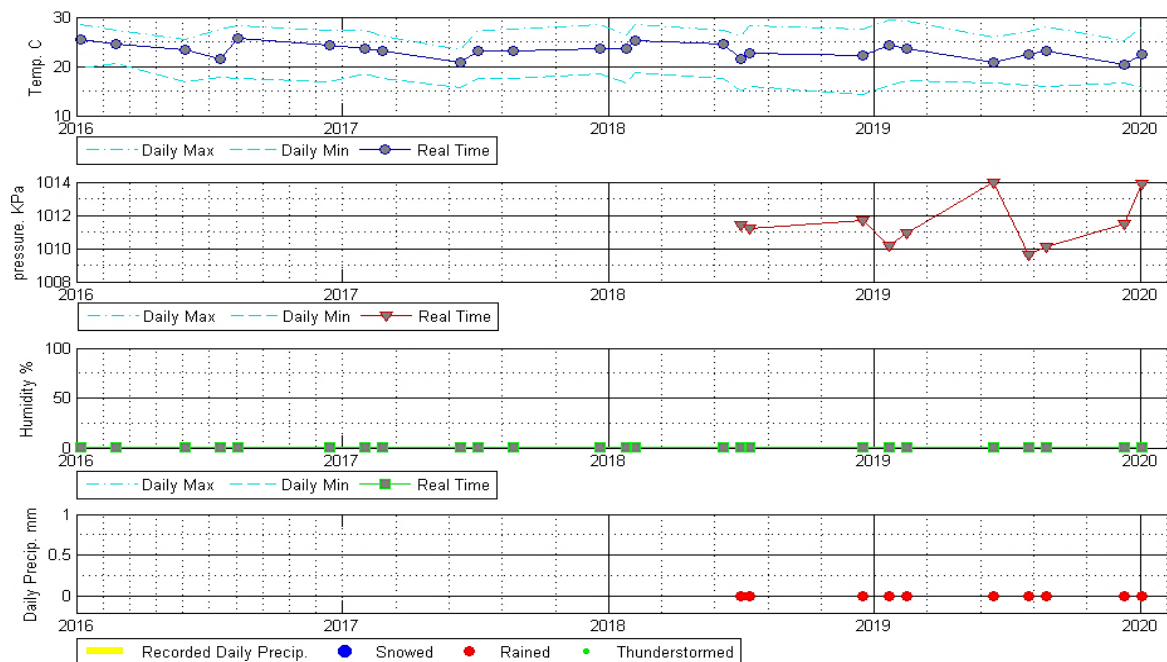
Se hizo el aplanamiento de los interferogramas (*Flattening*) y con el DEM SRTM se hizo la corrección de terreno doppler, en el cual los interferogramas quedan alineados y bien posicionados en el plano pasando de un sistema de coordenadas slant-range a coordenadas geográficas y con orientación al norte.

Remoción de la fase atmosférica

Debido a que la toma de las imágenes SAR se hacen en distintos momentos del tiempo, la señal emitida por el radar se ve afectada por las condiciones de la atmósfera, condiciones de temperatura, humedad y presión atmosférica, estos datos se obtuvieron a través de la plataforma de *DarkSky* la cual provee los servicios de pronósticos climáticos y su visualización.

Las estadísticas meteorológicas corresponden al momento de la adquisición de las imágenes satelitales, la información atmosférica incluye los datos de temperatura, presión, humedad, cobertura de nubes, precipitación y nieve, como se observan en la figura 14, los datos atmosféricos para cada imagen utilizada en la generación de interferogramas.

Figura 14 Datos atmosféricos

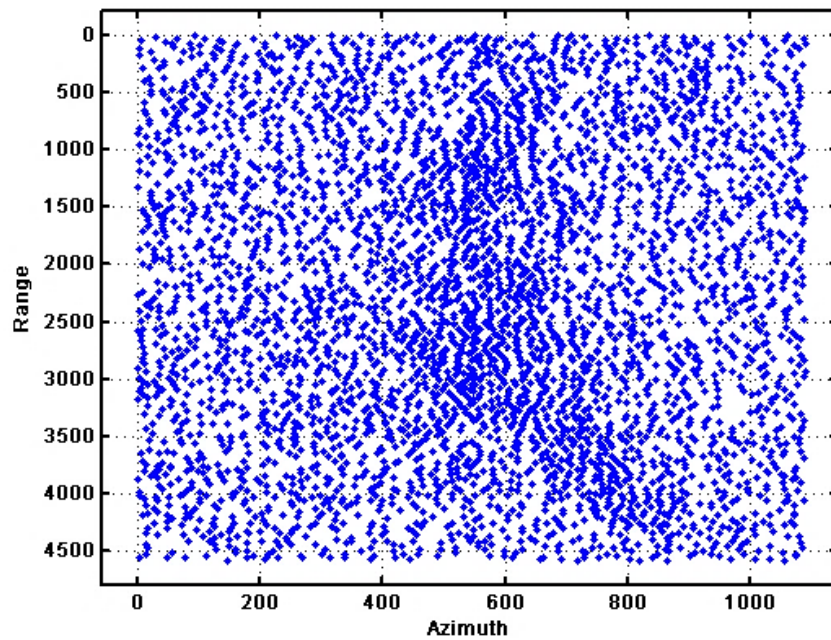


Fuente: Elaboración propia

La estimación de la fase atmosférica se realizó con la selección de los puntos esparcidos (*Sparse Points*) con los parámetros de amplitud estable con límite en los valores 0.65, en el cual se obtienen en total 4245 puntos, los cuales se evidencian en la figura 15, seguido del cálculo de las conexiones entre los puntos, en el cual se utilizó la triangulación de Delaunay donde la condición de esta es que cada triángulo formado no contenga el vértice de otro triángulo, el número de conexiones total es de 12707, la conexión de los puntos se evidencia en la figura 16.

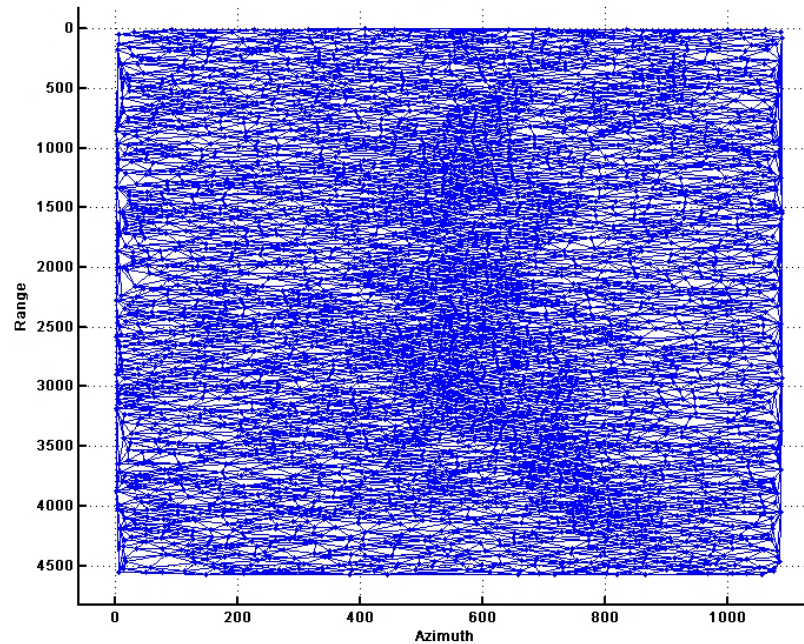
Los parámetros de proceso de estimación de la fase atmosférica que se utilizaron fueron de una tendencia lineal estimada de -5 hasta 5 (mm/año) y una altura estimada de -20 hasta 20, (metros), estos valores se eligieron con respecto a la zona en específico y que se ajustaran lo mejor posible para poder finalmente utilizar las alturas residuales y recuperar el retraso de la fase atmosférica. Cabe resaltar que las imágenes están georreferenciadas en slant-range y no están orientadas al norte geográfico además las imágenes se encuentran en la línea de visión del satélite (LOS).

Figura 15 Puntos esparcidos para fase atmosférica



Fuente: Elaboración propia

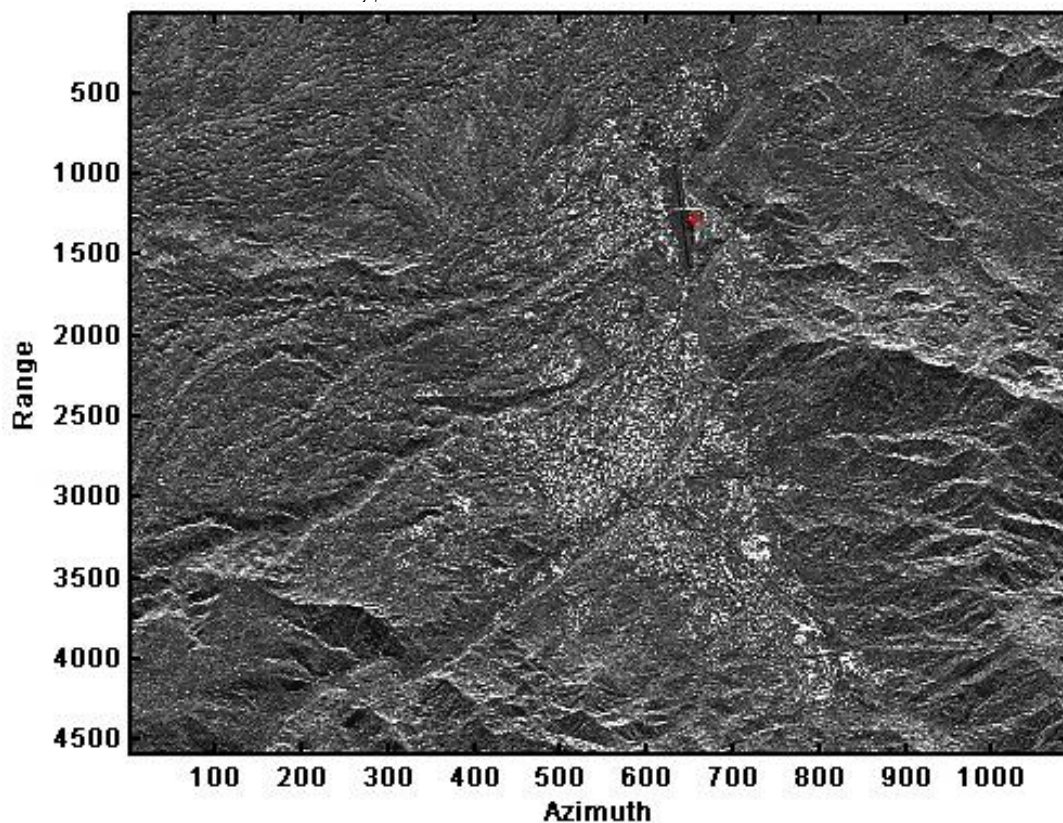
Figura 16 Conexiones para fase atmosférica



Fuente: Elaboración propia

Para la estimación de la altura residual se eligió un punto estable llamado punto de control en tierra, el cual tiene como característica que es un punto sin cambios de altura en la línea de visión del satélite (LOS), el punto elegido corresponde a la zona del aeropuerto con coordenadas en Latitud 4.814655 y Longitud -75.739323, cuyo valor de coherencia entre imágenes es relativamente alto y valores de amplitud estable en todas las imágenes SAR, este punto se muestra en la figura 17. Cabe resaltar que la imagen está georreferenciada en slant-range y no está orientada al norte geográfico además la imagen se encuentra en la línea de visión del satélite (LOS).

Figura 17 Punto de control en tierra

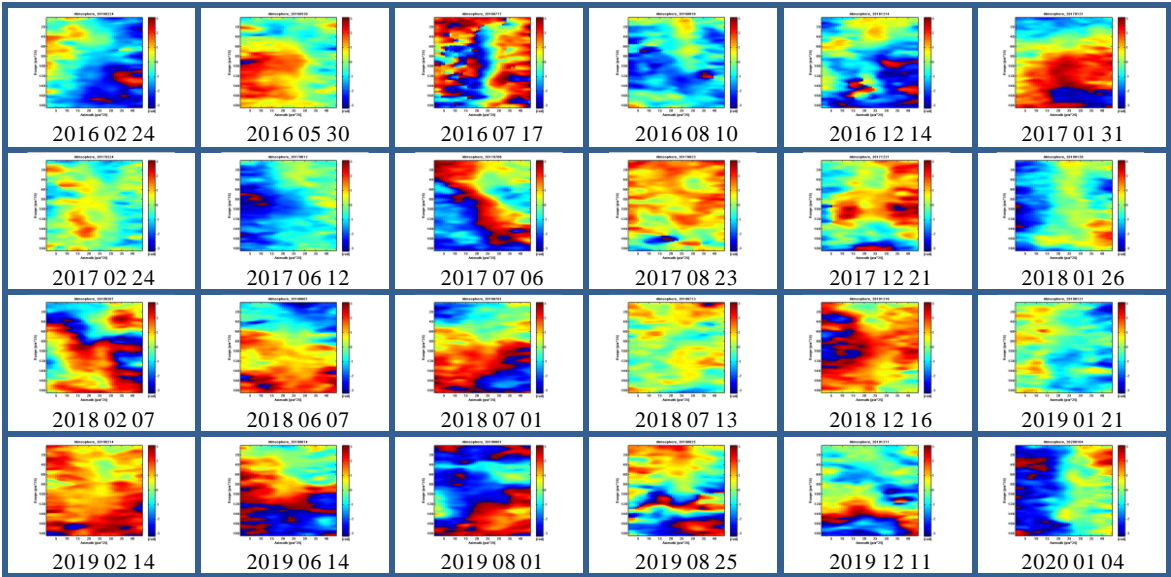


Fuente: Elaboración propia

Con base al punto de control en tierra, la tendencia lineal, los valores de altura estimada, la triangulación Delaunay, el método de los residuos invertidos de altura se calculó las imágenes de retardo troposférico que se muestran en la tabla 7. Cabe resaltar que las imágenes están

georreferenciadas en *slant-range* y no estás orientadas al norte geográfico además las imágenes se encuentran en la línea de visión del satélite (LOS).

Tabla 7 Imágenes de retardo troposférico



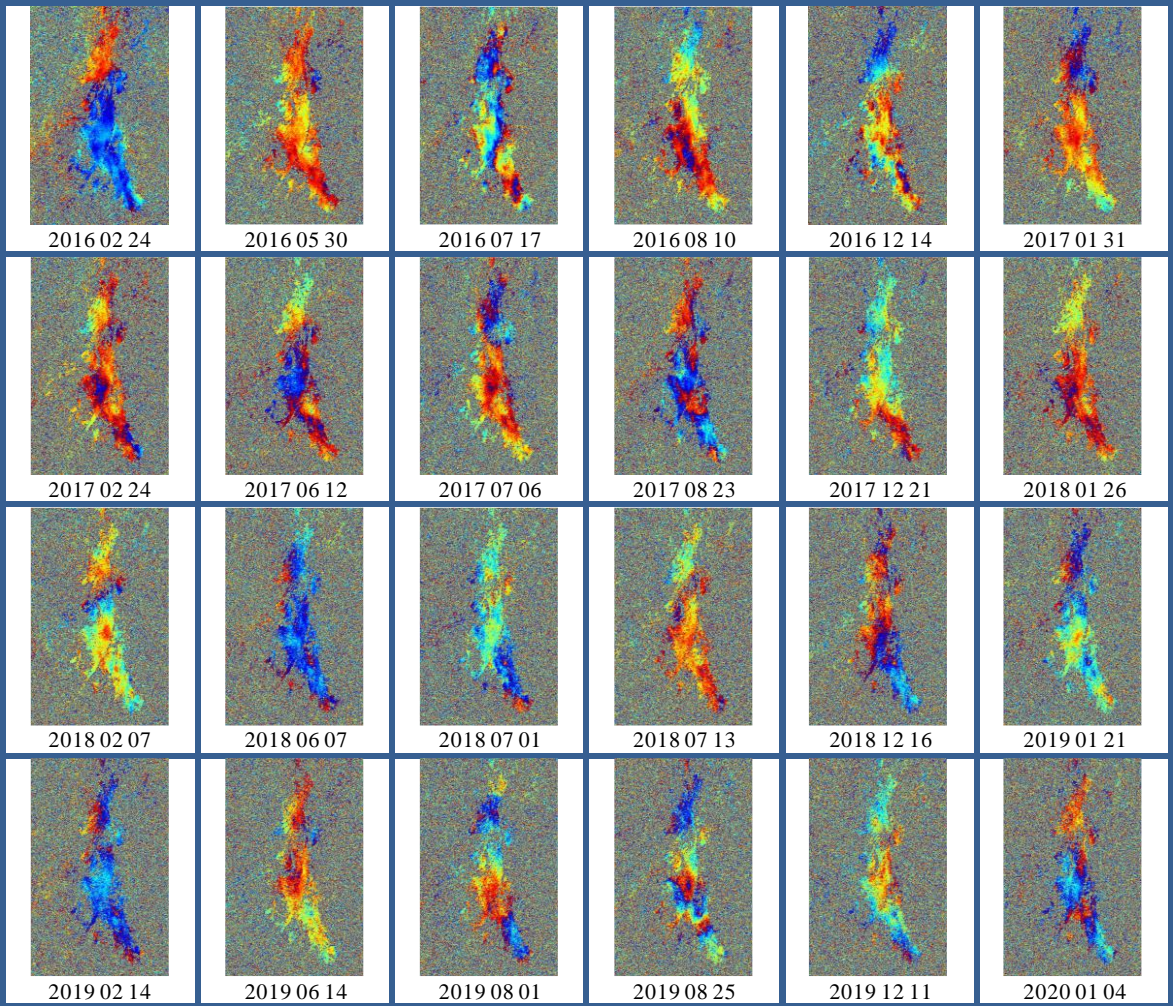
Fuente: Elaboración propia

Generación de interferogramas (InSAR)

Los interferogramas se formaron mediante la multiplicación cruzada píxel por píxel de la imagen maestra con el conjugado complejo píxel por píxel de cada imagen esclava. La amplitud de ambas imágenes se multiplicó y la fase interferométrica se representa como la diferencia de fase entre las dos imágenes. Gráficamente un interferograma está representado por una rampa de colores que pretende mostrar en qué lugares de la imagen hay diferencias de fase similares, donde se puede asumir que según el color y la forma de las franjas que se aprecian en los interferogramas, existen cambios o variaciones en la topografía de la escena.

Los interferogramas obtenidos se ilustran en la tabla 8, cada uno corresponde al resultado InSAR de la imagen maestra con cada imagen esclava. Cabe resaltar que las imágenes están georreferenciadas en *slant-range* y no estás orientadas al norte geográfico además las imágenes se encuentran en la línea de visión del satélite (LOS).

Tabla 8 Interferogramas



Fuente: Elaboración propia

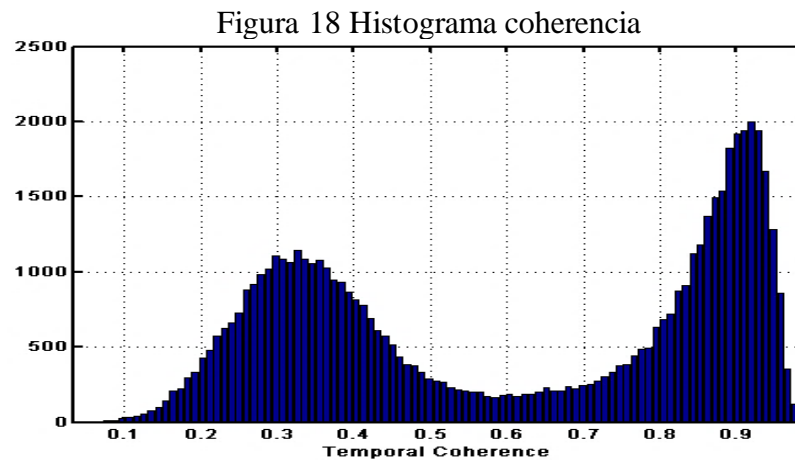
Filtrado adaptativo para cada interferograma (Goldstein)

Se agregó el filtro *Goldstein* con el fin de homogeneizar los datos de fase y disminuir el ruido (*Spekle*), en las zonas de coherencia mayores o iguales a 0.5, el filtro adaptativo se aplicó a un tamaño de ventana de 15 x 15 píxeles. Es el qué, según Goldstein & Werner (1998) “El cual reduce el ruido de la fase interferométrica y de esta forma se mejora la precisión de fase”.

5.2 Procesamiento de imágenes SAR

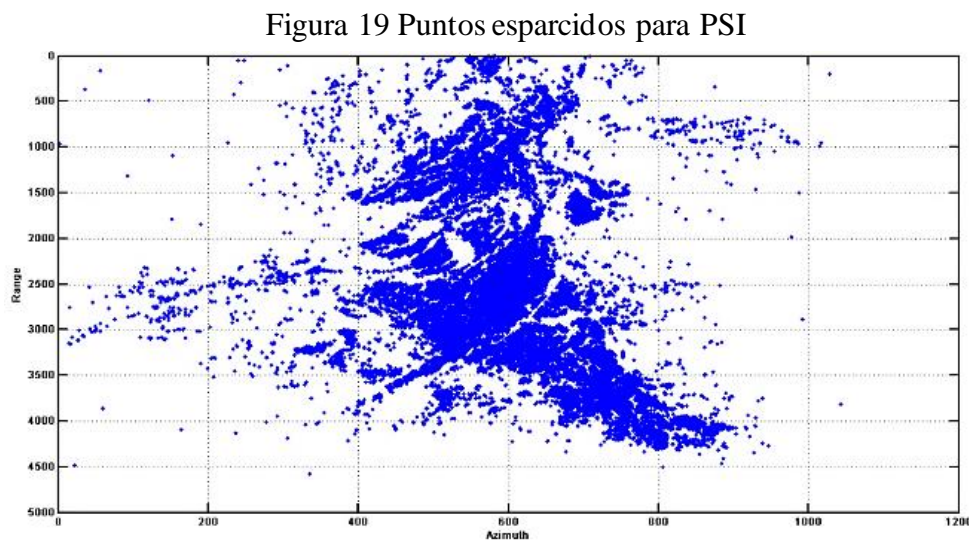
Cálculo de dispersores permanentes (PS)

Para el cálculo de los PS (*Persistent Scatterer*) se tomaron los valores de amplitud estable mayores o iguales a 0.6 en coherencia que son los datos con las condiciones adecuadas para dicho calculo, estos valores de coherencia y puntos se evidencian en la figura 18.



Fuente: Elaboración propia

Tomando dichos valores de coherencia se obtiene un total de 30049 PS los cuales se evidencian en la figura 19. Cabe resaltar que la imagen está georreferenciada en *slant-range* y no está orientada al norte geográfico además la imagen se encuentra en la línea de visión del satélite (LOS).



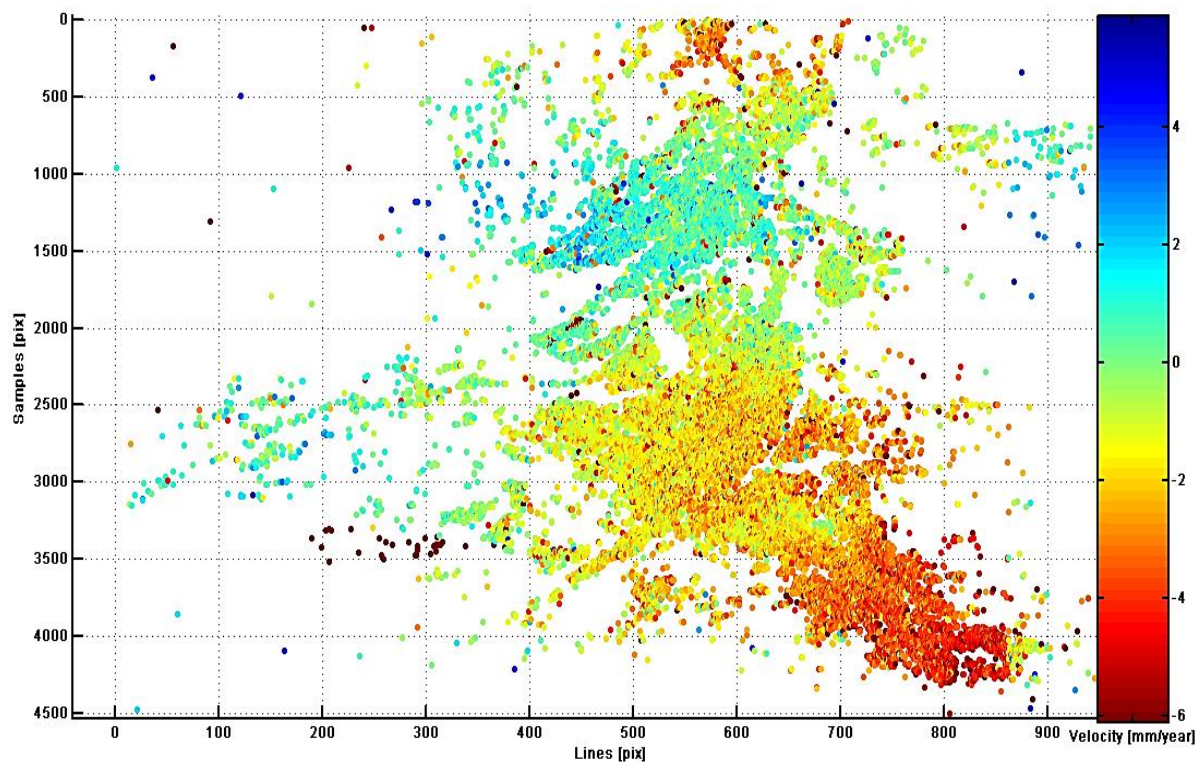
Fuente: Elaboración propia

Cálculo de velocidad de desplazamiento de PS

Para el cálculo de la velocidad de desplazamiento de los PS (*Persistent Scatterer*) se utilizó el punto de control que corresponde a la zona del aeropuerto con coordenadas en Latitud 4.814655 y Longitud -75.739323, la fase de los interferogramas corregidos y filtrados, los parámetros de proceso de estimación de la velocidad que se utilizaron fueron de una tendencia lineal estimada de -10 hasta 5 (mm/año) y una altura estimada de -10 hasta 20 (metros), estos valores fueron elegidos conforme a la zona de estudio, la rampa de colores utilizada va desde los valores de -6 hasta 6 (mm/año) que son los máximos y mínimos promedios en los que los PS muestran que se desplazan al año en LOS del satélite.

El resultado del cálculo de la velocidad de desplazamiento de los PS se evidencia en la figura 20. Cabe resaltar que la imagen está georreferenciada en slant-range y no está orientada al norte geográfico además la imagen se encuentra en la línea de visión del satélite (LOS).

Figura 20 Velocidad de desplazamiento de los PS

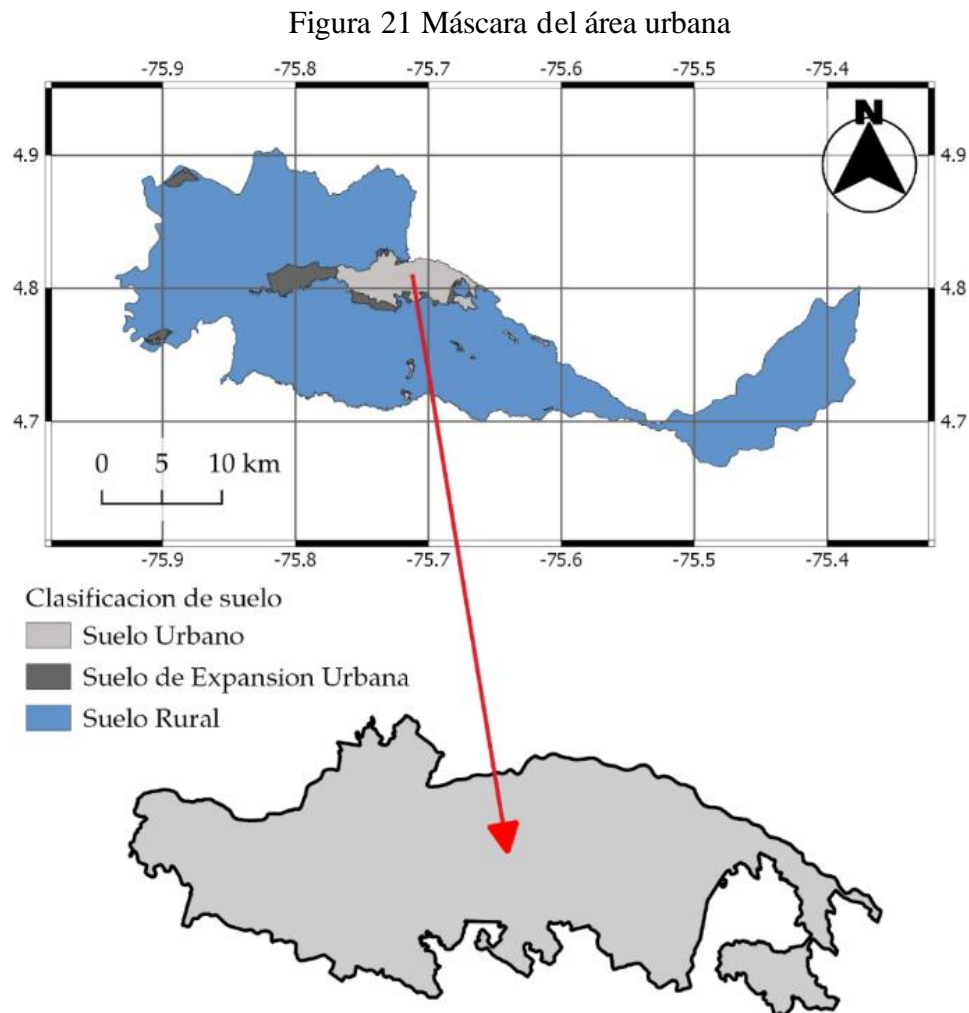


Fuente: Elaboración propia

Se utilizó el software libre y de Código Abierto **QGIS** para los procesos de selección de PS en el área urbana, validación de datos y generación de mapa de subsidencias.

Máscara del área urbana

Se utilizó la capa de clasificación de suelo, suelo urbano de la ciudad de Pereira, la cual está disponible en el Portal de datos libres geográficos institucional del municipio de Pereira (Risaralda - Colombia), de la secretaria de planeación municipal que por medio de su Sistema de Información Geográfico (SIGPER) dispone la información. Los datos utilizados son los escritos en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) Acuerdo 35 de 2016, con la norma específica del suelo. El polígono del área urbana se evidencia en la figura 21.

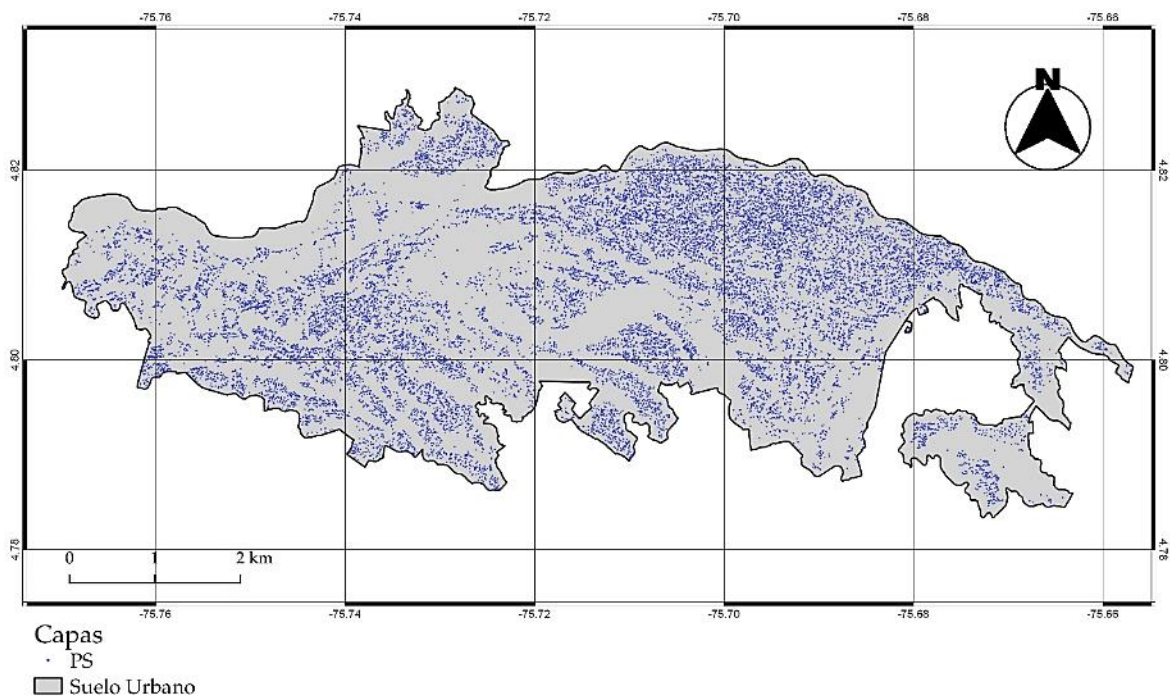


Fuente: Elaboración propia

Selección de PS en el área urbana

El polígono del área urbana se utilizó como máscara para seleccionar los PS (*Persistent Scatterer*) que se encuentren dentro del mismo, quedando un total de 18082 PS los cuales corresponden únicamente al área urbana del municipio de Pereira, adicionalmente se cambió el sistema de coordenadas de los PS de rango y azimuth a coordenadas geográficas en longitud y latitud, como se muestra en la figura 22.

Figura 22 PS en área urbana



Fuente: Elaboración propia

5.3 Posprocesamiento de imágenes SAR

Validación de puntos con datos de campo

La validación de los PS (*Persistent Scatterer*) se realizó en base a reportes de eventos históricos que la alcaldía municipal de Pereira Risaralda por medio de su sala de prensa dispone a la población, los cuales cumplen con las condiciones de eventos que pueden ser asociados al fenómeno de subsidencia, tales como hundimientos o daños estructurales en vías o viviendas, movimientos en masa y acordes a la naturaleza del fenómeno, se especificó la fecha de la publicación del reporte y la ubicación del evento.

Para llevar a cabo el proceso de validación se eligieron los PS que se encuentran dentro del área que se especifique en cada reporte de la sala de prensa oficial del municipio de Pereira y estas se organizaron por casos.

Se validaron los datos de velocidad de desplazamiento en mm/año, y desplazamiento acumulado desde la fecha de la toma de la primera imagen que corresponde al 07 Ene 2016 hasta la última imagen que corresponde al 04 Ene 2020, es decir que, el desplazamiento acumulado se da en un periodo de 4 años. Adicionalmente se agregaron las coordenadas de cada PS que se analizó.

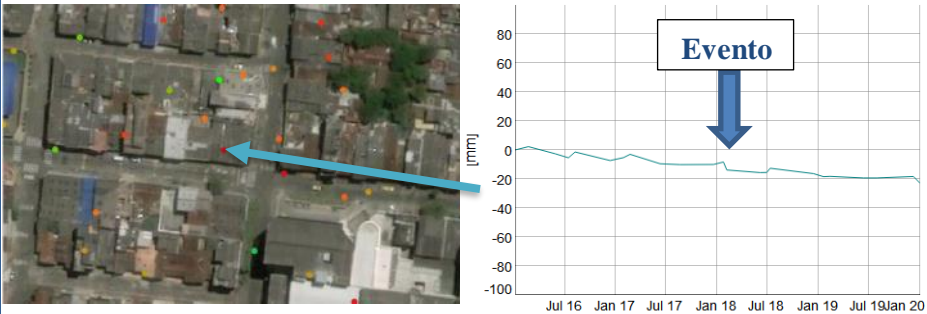
Se utilizó la imagen de Google Satellite versión WMS como mapa base para la ubicación de los PS.

En todos los casos analizados se encuentra la relación que hay entre el desplazamiento vertical negativo de los PS y los eventos con características propias que se atribuyen a hundimientos de estructuras y/o terreno los cuales están registrados en la sala de prensa de la alcaldía de Pereira, se evidencia la presencia de PS con datos negativos y positivos tanto en velocidad de desplazamiento y desplazamiento acumulado en el resto del área urbana del municipio de Pereira.

Se resalta que en los casos de eventos analizados la alteración de la velocidad de desplazamiento del PS seleccionado varía, vislumbrando el cambio de altura de la superficie con respecto a la fecha del evento, en el caso del colector Egoyá se pretende dar a conocer que la velocidad de desplazamiento de este, que tiene tendencia al hundimiento y no se marca la fecha por falta de un evento específico.

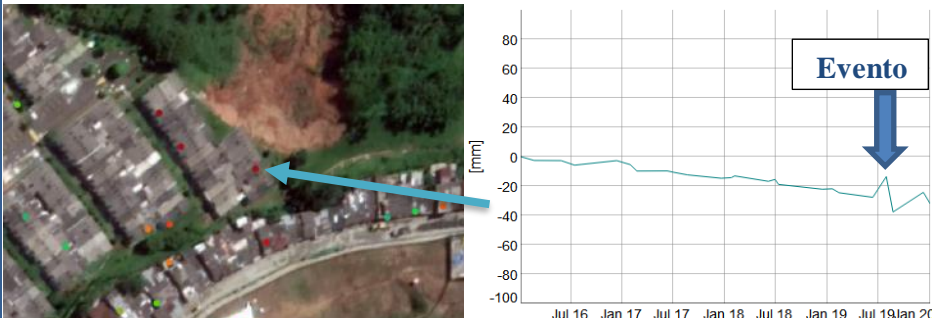
Los 5 casos de eventos registrados y analizados se encuentran organizados en la tabla 9, tabla 10, tabla 11, tabla 12 y tabla 13.

Tabla 9 Caso 1

Caso	1	Fecha	20/09/2018
Título publicación	ATENCIÓN OPORTUNA A SITUACIÓN EN LA ESCUELA LA PALABRA		
Descripción	“se evidenció que este muro colapsó presuntamente por la socavación por humedad ya que esta estructura data de varios años de antigüedad, siendo también antiguas las técnicas de construcción de estas casas vecinas, técnicas entre las que se encuentra tuberías de barro, relleno del terreno con escombros y falta de vigas.”		
Tipo de evento	Daño estructural por socavación en terreno		
Evidencia			
Velocidad (mm/año)	-5,55	Latitud:	4,8188513000000
Desplazamiento acumulado (mm)	-22,17	Longitud:	-75,6998300000000
ID PS	18583		
Enlace reporte	http://www.pereira.gov.co/NuestraAlcaldia/SaladePrensa/Paginas/ATENCI%C3%93N-OPORTUNA-A-SITUACI%C3%93N-EN-LA-ESCUELA-LA-PALABRA.aspx		


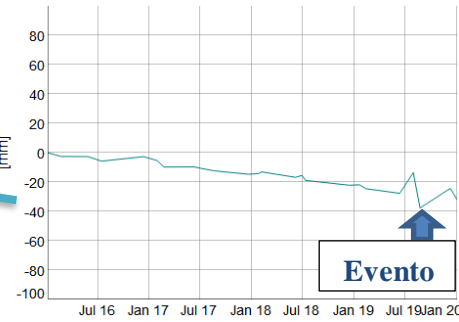
Fuente: Elaboración propia

Tabla 10 Caso 2

Caso	2	Fecha	04/09/2019
Título publicación	CON LA PRESENCIA DEL ALCALDE JUAN PABLO GALLO Y LA DIGER, LA CRUZ ROJA REALIZÓ ENTREGA DE CHEQUES A FAMILIAS AFECTADAS DEL CONJUNTO RESIDENCIAL PORTAL DE LA VILLA		
Descripción	“familias que resultaron afectadas por el deslizamiento presentado el pasado 11 de junio”		
Tipo de evento	Movimiento en masa		
Evidencia			
Velocidad (mm/año)	-7,30	Latitud:	4,8115774000000
Desplazamiento o acumulado (mm)	-29,12	Longitud:	-75,748123000000
ID PS	20653		
Enlace reporte	http://www.pereira.gov.co/NuestraAlcaldia/SaladePrensa/Paginas/CON-LA-PRESENCIA-DEL-ALCALDE-JUAN-PABLO-GALLO-Y-LA-DIGER,-LA-CRUZ-ROJA-REALIZ%C3%93-ENTREGA-DE-CHEQUES-A-FAMILIAS-AFECTADAS-DEL-.aspx		

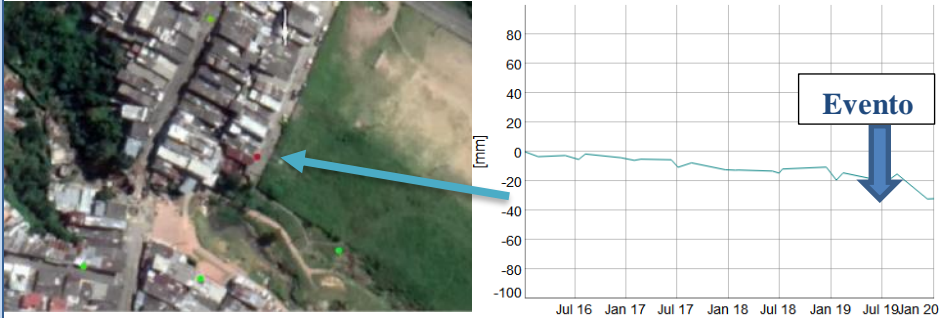
Fuente: Elaboración propia

Tabla 11 Caso 3

Caso	3	Fecha	15/10/2019
Título publicación	TRAS EL NUEVO DESLIZAMIENTO EN EL BARRIO MATECAÑA, EL BYPASS FUNCIONÓ DE FORMA EXITOSA, PERMITIENDO NORMALIDAD EN LA VÍA LA ROMELIA- EL POLLO		
Descripción	El Ingeniero Diego Ríos, encargado del diseño de las obras de estabilización y de mitigación para el control del riesgo por deslizamiento del Portal de la Villa, entregó declaraciones respecto a la importancia y respuesta del bypass construido en meses pasados para evitar afectaciones en el flujo vehicular en la vía La Romelia- el Pollo, ante un nuevo deslizamiento de tierra, como el que ocurrió en la madrugada del 13 de octubre.”		
Tipo de evento	Movimiento en masa		
Evidencia	 		
Velocidad (mm/año)	-7,30	Latitud:	4,8115774000000
Desplazamiento acumulado (mm)	-29,12	Longitud:	-75,748123000000
ID PS	20653		
Enlace reporte	http://www.pereira.gov.co/NuestraAlcaldia/SaladePrensa/Paginas/TRAS-EL-NUEVO-DESLIZAMIENTO-EN-EL-BARRIO-MATECA%91A,-EL-BYPASS-FUNCION%93-DE-FORMA-EXITOSA,-PERMITIENDO--NORMALIDAD-EN-LA-V%93-8DA-L.aspx		

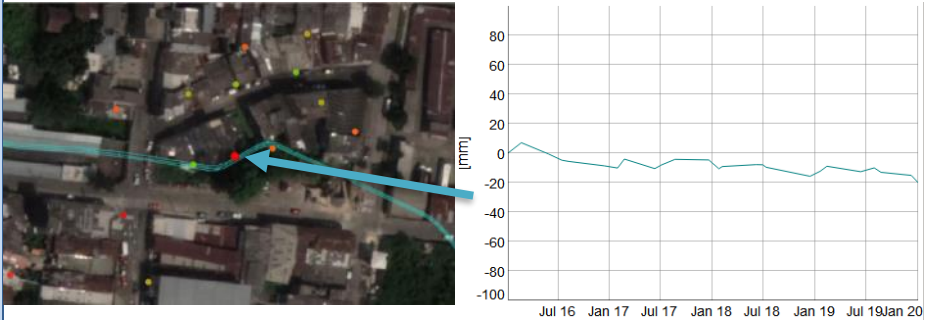
Fuente: Elaboración propia

Tabla 12 Caso 4

Caso	4	Fecha	27/05/2019
Título publicación	CONSEJO EXTRAORDINARIO DE GESTIÓN DEL RIESGO EMITE LA DECLARATORÍA DE CALAMIDAD EN LA QUEBRADA EL CALVARIO		
Descripción	“atender la calamidad pública decretada en la quebrada El Calvario, que se ubica entre los sectores de Monserrate y Nuevo Plan o Parque Lineal, en la comuna Villasantana. La socavación del afluente hídrico viene generando un proceso de subsidencia en la zona, la cual se ha manifestado en la pérdida parcial de la vía y algunas redes de acueducto y alcantarillado pertenecientes a la empresa Aguas y Aguas de Pereira.”		
Tipo de evento	Socavación de banca		
Evidencia			
Velocidad (mm/año)	-5,52	Latitud:	4,8013372000000
Desplazamiento acumulado (mm)	-22,02	Longitud:	-75,666983999999
ID PS	2244		
Enlace reporte	http://pereira.gov.co/NuestraAlcaldia/SaladePrensa/Paginas/CONSEJO-EXTRAORDINARIO-DE-GESTI%C3%93N-DEL-RIESGO-EMITE-LA-DECLARATOR%C3%8DA-DE-CALAMIDAD-EN-LA-QUEBRADA-EL-CALVARIO.aspx		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13 Caso 5

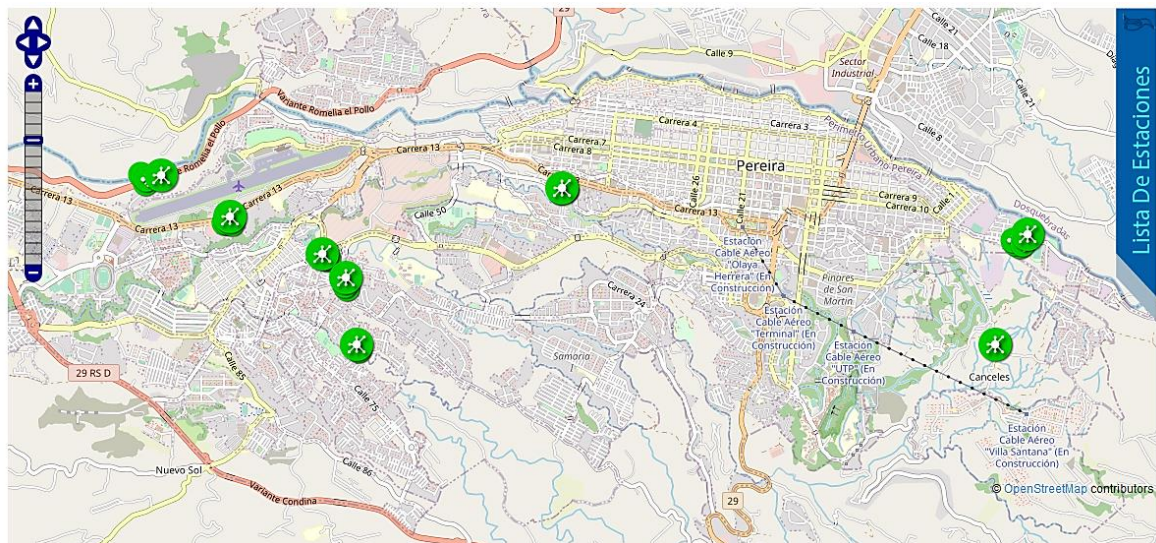
Caso	5	Fecha	06/06/2018
Título publicación	CON EL NUEVO EGOYÁ, ESTAREMOS MÁS TRANQUILOS		
Descripción	“Gerente de Aguas y Aguas de Pereira, resaltó que la decisión de adelantar las obras de manera inmediata se tomó luego de conocer el último estudio de la Empresa, en el cual se advierte el riesgo inminente en este sector de la ciudad, donde se presenta insuficiencia hidráulica y deterioro de la estructura.”		
Tipo de evento	Daño estructural de colector de aguas		
Evidencia	 <p>The evidence section contains two visual elements. On the left is an aerial photograph of a city street with a blue arrow pointing to a specific location. On the right is a line graph showing displacement (mm) over time from July 2016 to January 2020. The graph shows a fluctuating line with a general downward trend, indicating subsidence.</p>		
Velocidad (mm/año)	-4,12	Latitud:	4,8118196000000
Desplazamiento acumulado (mm)	-16,44	Longitud:	-75,6975690000000
ID PS	11931		
Enlace reporte	http://www.pereira.gov.co/NuestraAlcaldia/SaladePrensa/Paginas/CON-EL-NUEVO-EGOY%C3%81,-ESTAREMOS-M%C3%81S-TRANQUILOS.aspx		

Fuente: Elaboración propia

Adicional a los 4 casos de eventos registrados en la sala de prensa de la alcaldía del municipio de Pereira del departamento de Risaralda, se analizó la red de monitoreo de laderas y taludes que está en funcionamiento por la Dirección de Gestión del Riesgo de Pereira (DIGER), por medio de la empresa AyV Ingeniería SAS. En la cual se encuentran 8 estaciones de monitoreo. Dichas estaciones

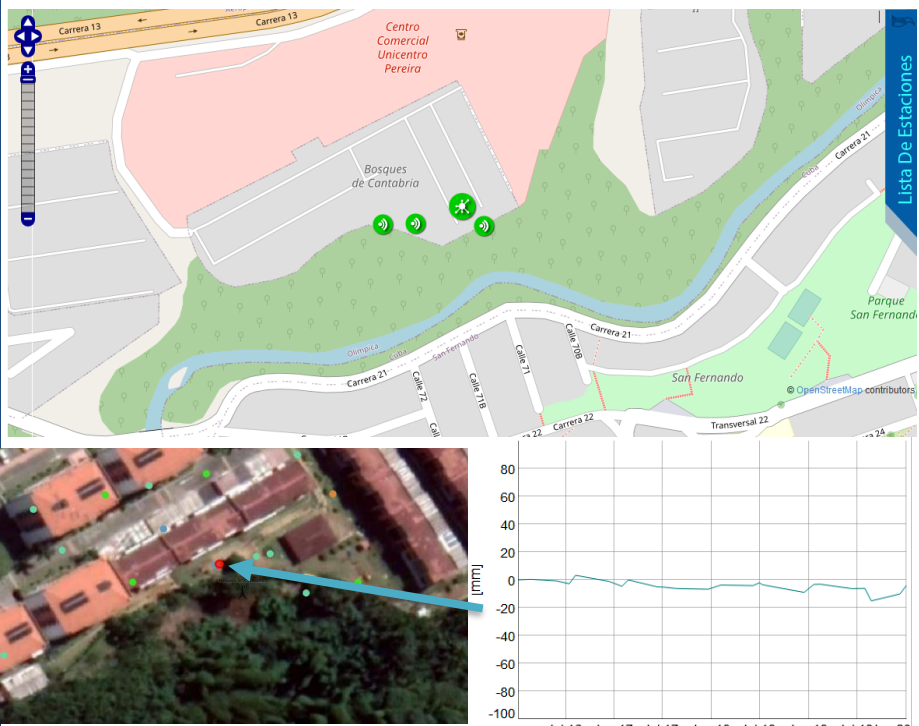
Para llevar a cabo el proceso de validación se eligieron los PS que se encuentran más cercanos a las estaciones de monitoreo de laderas y taludes, se validaron los datos de velocidad de desplazamiento en mm/año, y desplazamiento acumulado desde la fecha de la toma de la primera imagen que corresponde al 07 Ene 2016 hasta la última imagen que corresponde al 04 Ene 2020, es decir que, el desplazamiento acumulado se da en un periodo de 4 años. Adicionalmente se agregaron las coordenadas de cada PS que se analizó.

Figura 23 Red de monitoreo de laderas y taludes DIGER - Alcaldía de Pereira



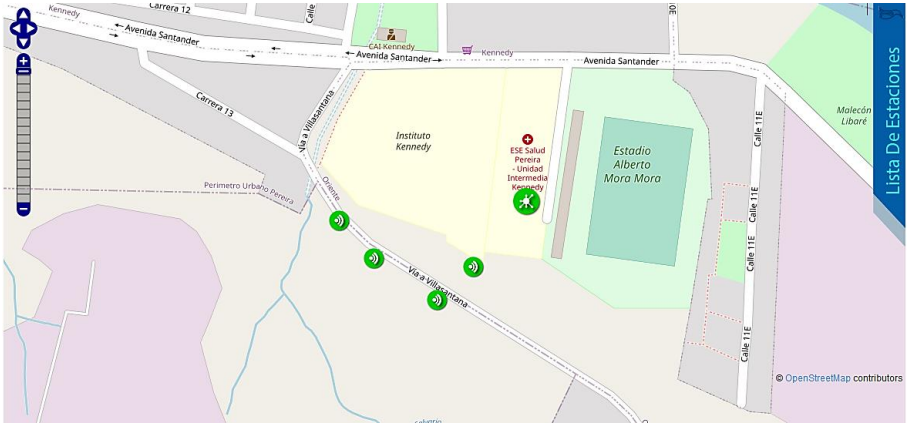

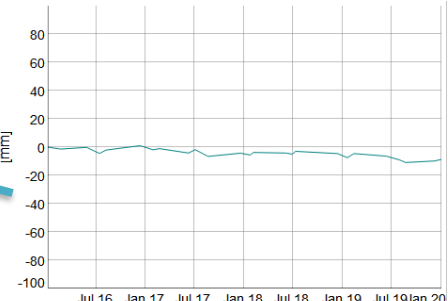
En el 85% de los casos analizados (6 de 7), se encuentra la relación que hay entre el desplazamiento vertical negativo de los PS próximos a las estaciones de monitoreo de laderas y taludes, siendo la estación Portal de las Mercedes la zona que se mostró más estable con una velocidad de desplazamiento de -0.1 mm/año, los resultados de los análisis se encuentran en la tabla 14, tabla 15, tabla 16, tabla 17, tabla 18, tabla 19 y tabla 20.

Tabla 14 Estación Bosques de Cantabria

Estación	Bosques de Cantabria		
Evidencia			
Velocidad (mm/año)	-2,00	Latitud:	4,8080231000000
Desplazamiento acumulado (mm)	-7,97	Longitud:	-75,74155100000
ID PS	16588		

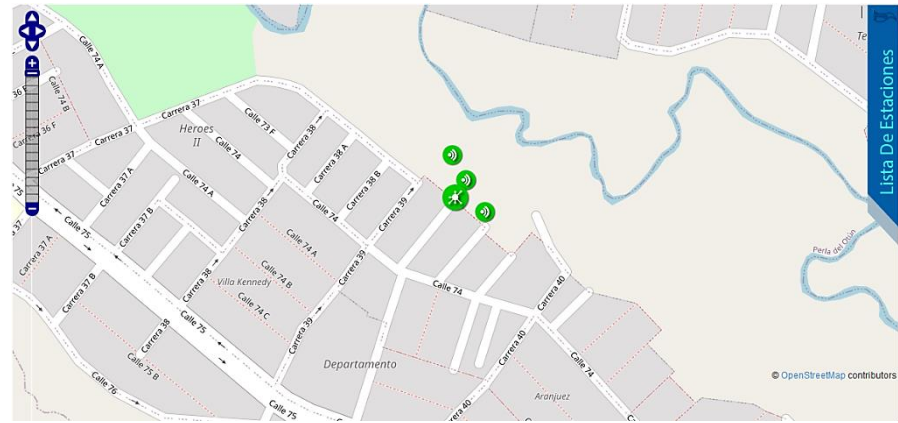

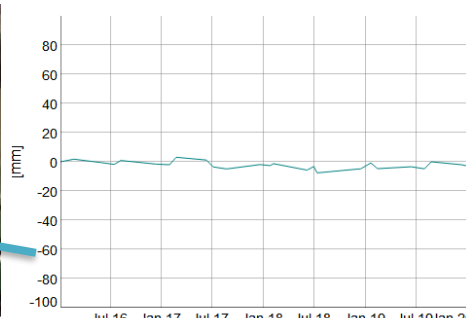
Fuente: Elaboración propia

Tabla 16 Estación Villa Santana

Estación	Villa Santana		
Evidencia	  		
Velocidad (mm/año)	-2,18	Latitud:	4,8069700000000
Desplazamiento acumulado (mm)	-8,71	Longitud:	-75,672253999999
ID PS	4773		

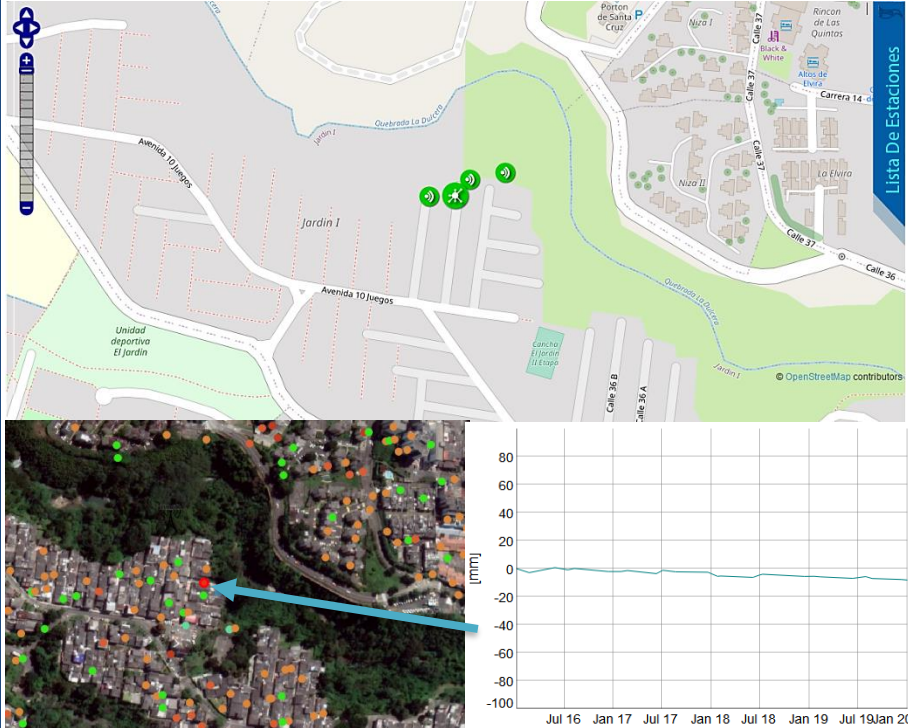
Fuente: Elaboración propia

Tabla 17 Estación Albania

Estación	Albania		
Evidencia	  		
Velocidad (mm/año)	-1,05	Latitud:	4,796588600000
Desplazamiento acumulado (mm)	-4,20	Longitud:	-75,72931599999
ID PS	5529		


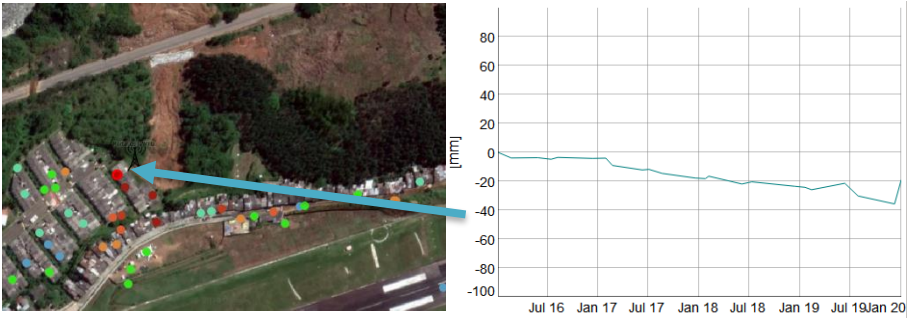
Fuente: Elaboración propia

Tabla 18 Estación El Jardín

Estación	El Jardín		
Evidencia			
	Velocidad (mm/año)	-1,91	Latitud: 4,8102308000000
	Desplazamiento acumulado (mm)	-7,63	Longitud: -75,71150299999
	ID PS	13082	

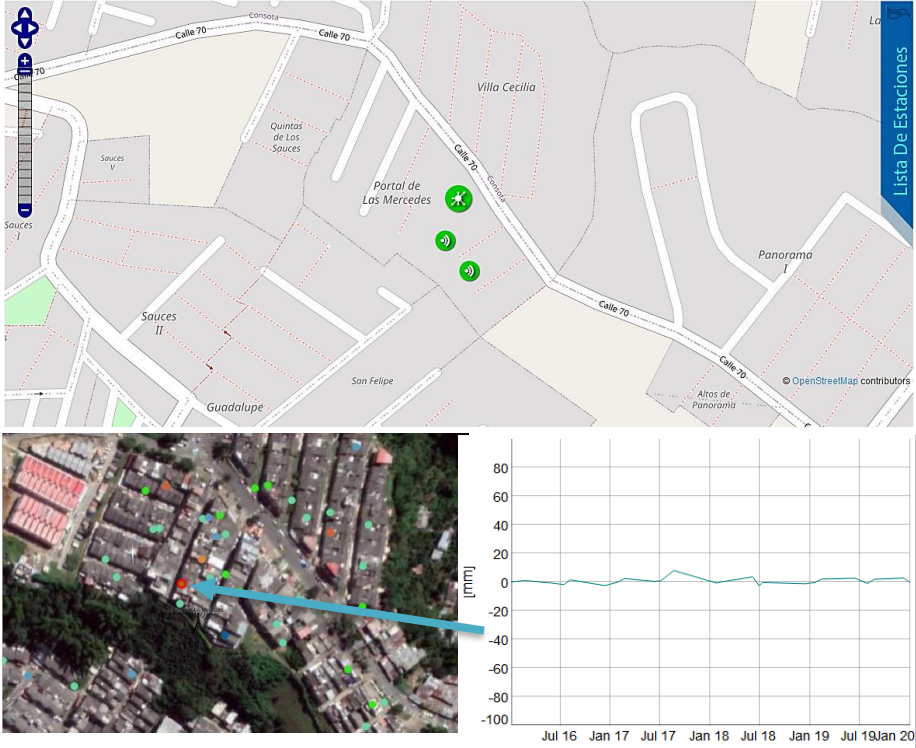
Fuente: Elaboración propia

Tabla 19 Estación Portal de la Villa

Estación	Portal de la Villa		
Evidencia			
			
Velocidad (mm/año)	-8,22	Latitud:	4,8117676000000
Desplazamiento acumulado (mm)	-32,83	Longitud:	-75,74845299999
ID PS	20842		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20 Estación Portal de las Mercedes

Estación	Portal de las Mercedes		
Evidencia			
Velocidad (mm/año)	0,01	Latitud:	4,8029965000000
Desplazamiento acumulado (mm)	0,05	Longitud:	-75,73147099999
ID PS	10404		

Fuente: Elaboración propia

5.4 Generación de mapa de amenaza por fenómeno de subsidencia

La generación del mapa de subsidencia se llevó a cabo con los valores de velocidad de desplazamiento vertical en mm/año de cada PS (*Persistent Scatterer*), se hizo el uso de la capa de clasificación de suelo, se re proyectaron las capas hacia el sistema geodésico de coordenadas geográficas WGS 84 para la localización de los elementos del mapa, utilizando una rampa de colores que indica de menor a mayor velocidad.

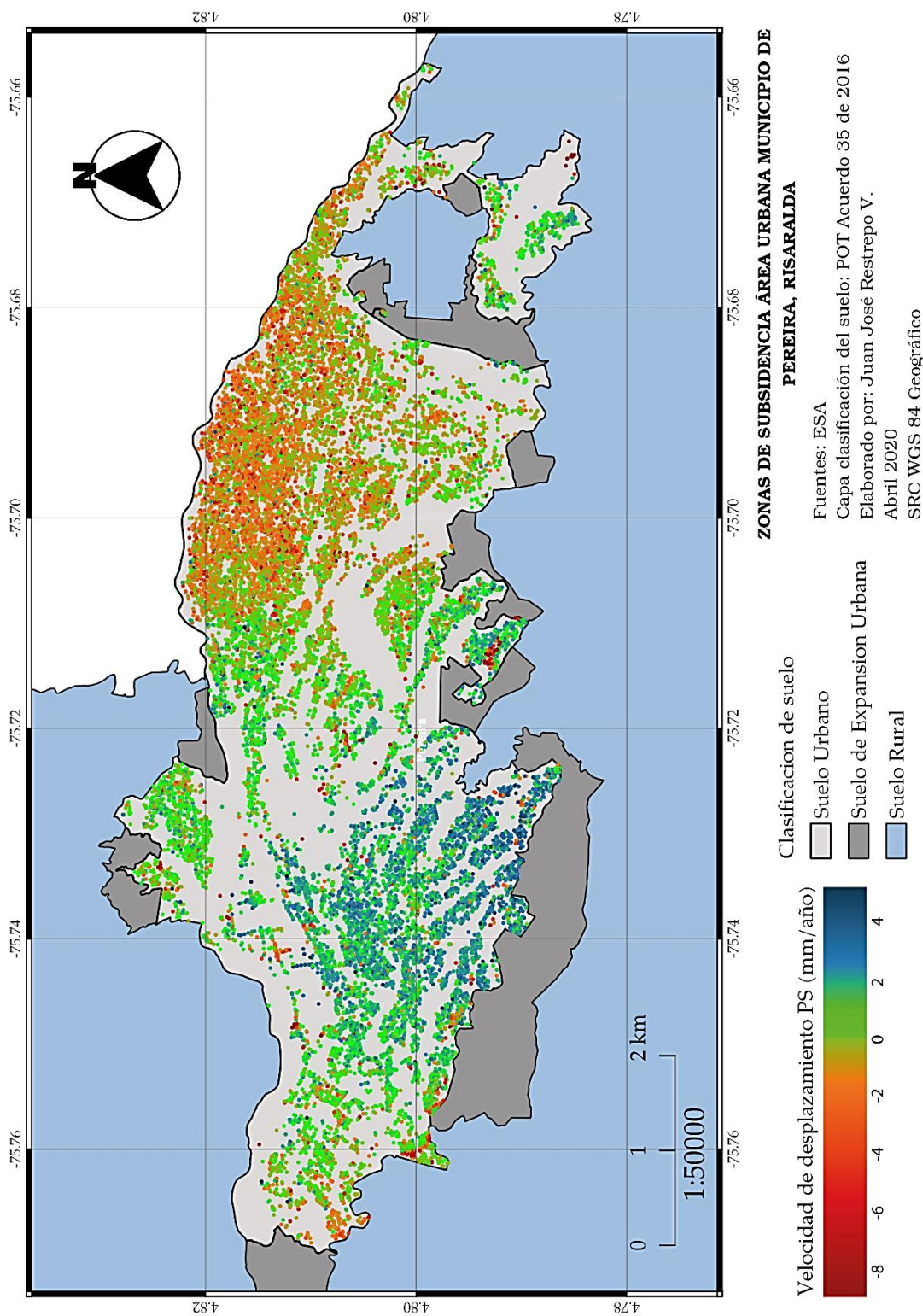
Este mapa resultante permite la visualización de las zonas donde ocurre el fenómeno de subsidencia ya sea en alejamiento o acercamiento de cada PS en LOS del satélite, que se traduce en zonas donde la superficie del terreno ha tenido una tendencia al desplazamiento vertical con velocidad en mm/año representada en una escala de colores en el período de 4 años (2016-2020).

Los PS representados en el mapa equivalen a los píxeles con una coherencia mayor o igual al 60% en amplitud de la señal retrodispersada, y comparados en la superposición de la totalidad de interferogramas obtenidos con la técnica DInSAR, dichos píxeles son representados en puntos y cada uno brinda información sobre el cambio de altura.

Los píxeles con una coherencia menor al 60% en amplitud no fueron analizados en este trabajo ya que estos valores bajos pueden corresponder a grandes cambios externos en la superficie dispersora, dichos cambios pueden ser de varios tipos como lo son, presencia de vegetación por el continuo movimiento del viento o su crecimiento natural, cambios abruptos en la altura del terreno por remoción o llenos de tierra u otro material, superficies de agua, movimiento de vehículos o cualquier elemento que interfiera en la superficie dispersora de la señal que emite y recibe el SAR.

En la figura 24 se observa la salida del modelo donde se aprecia, los PS distribuidos en el área de interés y cada uno representado por un color que de acuerdo con la rampa de color indica su velocidad de desplazamiento.

Figura 24 Mapa de zonas subsidencia área urbana



Fuente: Elaboración propia

5.5 Análisis de datos por comuna

Para el análisis de los valores por comunas, se agruparon los PS (*Persistent Scatterer*) según los correspondientes en cada una de las 21 comunas del municipio de Pereira en el departamento de Risaralda, esto con el fin de visualizar los resultados de una manera más general y mostrar el comportamiento tendencial de los valores de desplazamiento vertical de velocidad de estas, se tuvo en cuenta, los valores máximos y mínimos, el valor central de la mediana, el promedio, la varianza y la desviación estándar de los datos agrupados, estos valores se observan en la tabla 21.

Dichos datos son el conjunto numérico de la velocidad de los PS que corresponden a cada comuna del fenómeno de subsidencia en el periodo de 4 años (2016-2020), las magnitudes de los datos están dadas de acuerdo con la velocidad de desplazamiento vertical en mm/año.

Las comunas y las delimitaciones que se utilizaron son las que corresponden al acuerdo municipal No. 35 de 2016 por medio del cual se adopta la revisión de largo plazo del Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Pereira.

Tabla 21 Datos estadísticos, análisis por comuna

Comuna	Cuenta de PS	Min	Max	Mediana	Promedio	Varianza	Desviación Estándar
Centro	2538	-10,00	4,66	-1,78	-1,77	1,21	1,10
Rio Otún	1572	-8,25	5,00	-1,75	-1,72	1,59	1,26
Villavicencio	446	-6,84	4,13	-1,70	-1,77	1,44	1,20
Oriente	745	-6,15	5,00	-1,64	-1,69	1,04	1,02
San Nicolas	217	-9,11	0,75	-1,46	-1,63	1,59	1,26
Boston	1024	-10,00	5,00	-1,44	-1,49	1,11	1,05
Universidad	1624	-7,37	3,53	-1,41	-1,50	0,96	0,98
El Poblado	950	-5,72	5,00	-0,81	-0,79	1,27	1,13
El Jardín	1110	-7,07	4,49	-0,77	-0,82	1,29	1,14
Villa Santana	556	-10,00	5,00	-0,57	-0,79	2,94	1,71
Del Café	684	-10,00	3,41	-0,54	-0,62	1,17	1,08
Ferrocarril	343	-8,22	5,00	-0,27	-0,45	2,44	1,56
Batallón	174	-5,37	1,53	-0,23	-0,39	0,99	0,99
Olímpica	1856	-9,21	4,03	-0,14	-0,30	1,61	1,27
Aeropuerto	185	-8,34	3,72	-0,03	-0,25	2,96	1,72
El Rocío	121	-6,97	3,94	0,34	0,14	1,64	1,28
Consota	635	-10,00	4,24	0,40	-0,03	4,28	2,07
San Joaquín	1329	-7,46	5,00	0,58	0,31	2,44	1,56
Cuba	660	-5,98	4,48	0,72	0,65	1,09	1,04
El Oso	898	-7,37	5,00	0,93	0,84	1,52	1,23
Perla del Otún	324	-8,44	5,00	1,06	0,94	1,52	1,23

Fuente: Elaboración propia

El análisis de los datos para cada comuna se realizó utilizando el *Plugin Group Stats* del programa del software libre y de Código Abierto QGIS, haciendo el Uso de la capa vectorial de comunas como máscara de la capa de puntos de PS.

A partir de la tabla donde se presentan los datos de acuerdo con la velocidad de desplazamiento en mm/año, se puede decir que, se eligió la medida de posición central mediana para la representación de los valores tendenciales lo que quiere decir que se afecta menos el valor medio del conjunto de datos por la presencia de sesgos en la distribución o de valores extremos de los PS presentes en cada comuna con respecto a la medida de promedio.

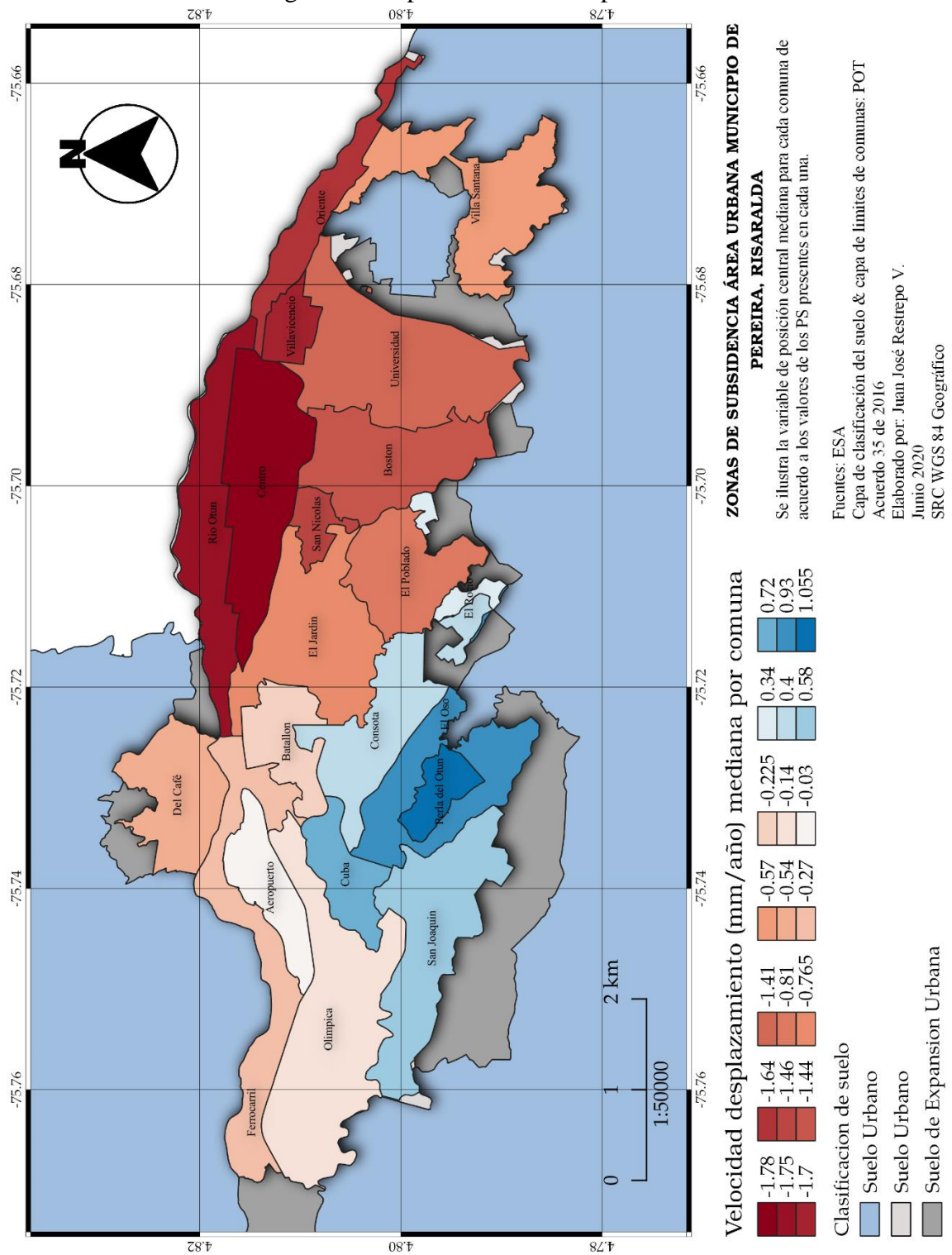
Este mapa resultante permite la visualización de el valor central de la mediana de velocidad de desplazamiento en mm/año por cada comuna del municipio de Pereira en el departamento de Risaralda, representada en una tabla de colores que corresponde a cada valor, ya sea en alejamiento tomando los valores negativos o acercamiento tomando los valores positivos con respecto al LOS del satélite, que se traduce en zonas donde la superficie del terreno a tenido una tendencia al desplazamiento vertical en el período de 4 años (2016-2020).

Los polígonos representados en el mapa equivalen al valor de la mediana de los conjuntos de PS correspondientes a cada una, con una coherencia mayor o igual al 60% en amplitud de la señal retrodispersada, y comparados en la superposición de la totalidad de interferogramas obtenidos con la técnica DInSAR, dichos polígonos son representados en colores y cada uno brinda información sobre la tendencia del cambio de altura de cada comuna.

En la figura 25 se observa el mapa que representa dichos valores de la mediana de velocidad en mm/año por comuna en colores que representan el valor máximo de la mediana en hundimiento en color rojo intenso, y valores máximo de la media en elevación en color azul intenso.

Cabe aclarar que la medida de posición central mediana es el valor medio del total de datos y esta no representa los valores máximos o mínimos de velocidad de desplazamiento de cada comuna, esta medida se eligió para representar de manera gráfica la tendencia de desplazamiento de cada comuna y esta no refleja el detalle de cada PS presente del conjunto de datos por comuna.

Figura 25 Mapa de subsidencia por comuna



Fuente: Elaboración propia

A partir del gráfico sobre la mediana de velocidad de desplazamiento vertical de cada comuna del municipio de pereira y comparadas entre si, se puede concluir que, las comunas ubicadas a la izquierda del gráfico y con valores por debajo de 0 mm/año tienen tendencia al hundimiento mientras que las comunas ubicadas a la derecha del gráfico y con valores por encima de 0 mm/año tienen tendencia de elevación.

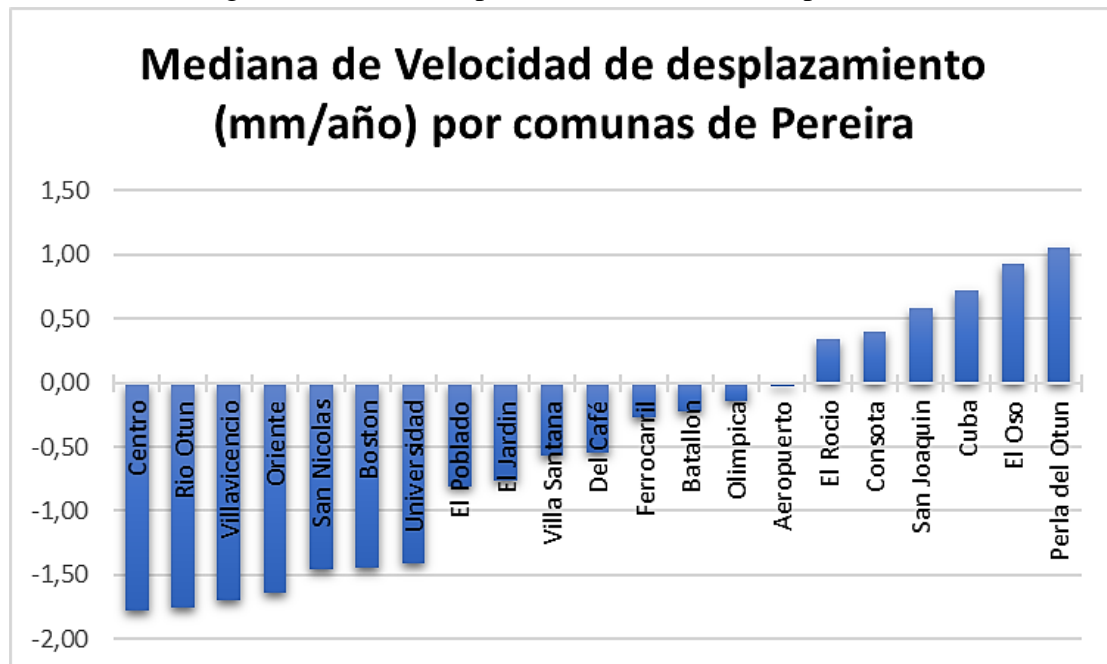
Las comunas con tendencia al hundimiento son, Centro, Rio Otún Villavicencio, Oriente, San Nicolás, Boston, Universidad, El poblado, El Jardín, Villa Santana, Del Café, Ferrocarril, Batallón y Olímpica.

La comuna que mostró mayor estabilidad comparado con el resto de comunas es Aeropuerto.

Las comunas que muestran tendencia de elevación son, El rocío, Consota, San Joaquín, Cuba, El Oso y Perla del Otún.

La figura 26 representa la comparación de la medida central mediana correspondiente a las comunas en el eje horizontal, ordenadas de menor a mayor velocidad de desplazamiento en mm/año en el eje vertical.

Figura 26 Medida de posición central mediana por comuna



Fuente: Elaboración propia

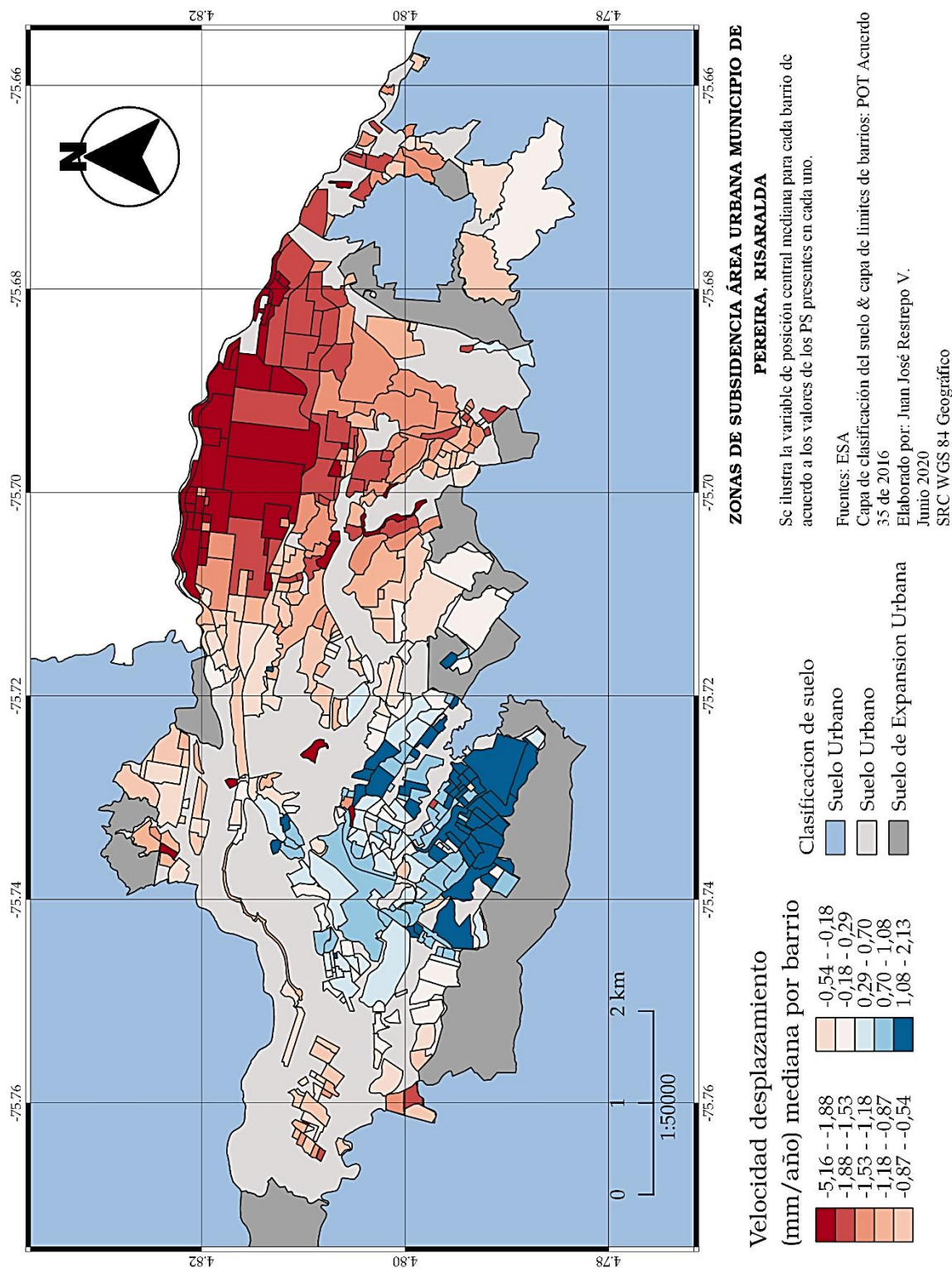
5.6 Análisis de datos por barrios

Para el análisis de los valores, se agruparon los PS (*Persistent Scatterer*) según los correspondientes en cada uno de los barrios del municipio de Pereira en el departamento de Risaralda, esto con el fin de visualizar los resultados de una manera más detallada y mostrar el comportamiento tendencial de los valores de desplazamiento vertical de velocidad dada en mm/año de estos, se tuvo en cuenta, los valores máximos y mínimos, el valor central de la mediana, el promedio, la varianza y la desviación estándar de los datos agrupados.

Como se muestra en la figura 27, el mapa indica el valor del valor de medida central mediana para cada barrio del valor de velocidad en mm/año, en colores que representan el valor máximo de la mediana en hundimiento en color rojo intenso, y valores máximo de la media en elevación en color azul intenso.

Cabe aclarar que la medida de posición central mediana es el valor medio del total de datos y esta no representa los valores máximos o mínimos de velocidad de desplazamiento de cada barrio, esta medida se eligió para representar de manera gráfica la tendencia de desplazamiento de cada barrio y esta no refleja el detalle de cada PS presente del conjunto de datos por barrio.

Figura 27 Mapa de subsidencia por barrio



Fuente: Elaboración propia

5.7 Análisis de datos en llenos antrópicos

Tras la comprobación de los PS sobre llenos antrópicos contemplados en el acuerdo municipal No. 35 de 2016 por medio del cual se adopta la revisión de largo plazo del Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Pereira, se procedió a evaluar por medio de la medida de posición central mediana si hay una relación mayor entre la velocidad de desplazamiento vertical de las zonas donde hay llenos antrópicos y las zonas donde no hay llenos antrópicos.

Se tomaron los valores de velocidad de desplazamiento vertical en mm/año de la totalidad de PS presentes en las zonas que corresponden a llenos antrópicos, se hizo el conteo de estos, se calculó la medida de posición central mediana y la desviación estándar, los resultados son mostrados en la tabla 22.

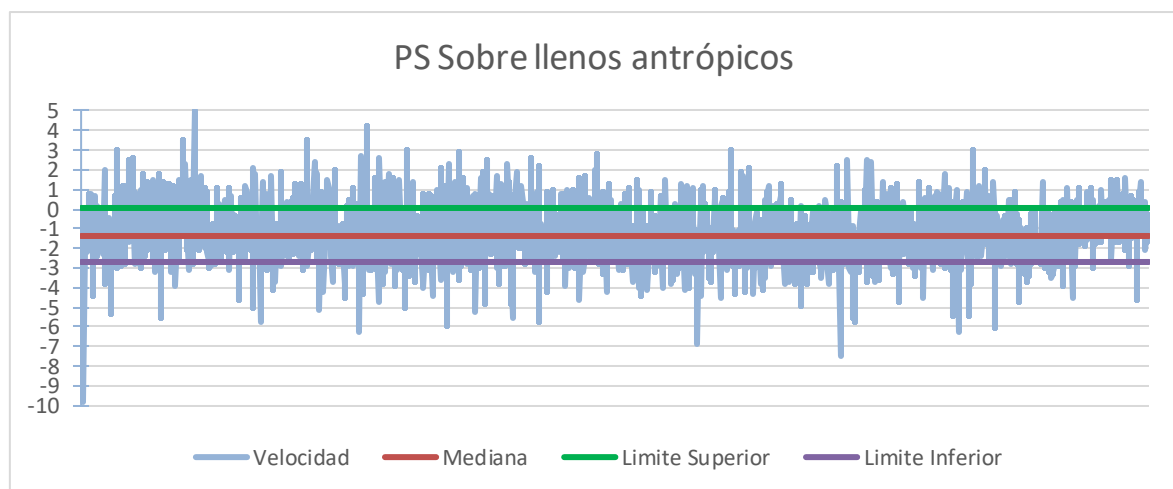
Tabla 22 Datos de velocidad mediana de PS sobre llenos antrópicos

Conteo PS	2530
Mediana	-1,34
Desviación estándar	1,39

Fuente: Elaboración propia

Se graficaron los 2530 PS en función de la velocidad de desplazamiento vertical y la mediana de esta, para evidenciar gráficamente dichos resultados, estos se muestran en la figura 28.

Figura 28 Gráfico de velocidad mediana de PS sobre llenos antrópicos



Fuente: Elaboración propia

Para las zonas que no corresponden a llenos antrópicos, se tomaron los valores de velocidad de desplazamiento vertical en mm/año de la totalidad de PS que están fuera de las zonas que corresponden a llenos antrópicos, se hizo el conteo de estos, se calculó la medida de posición central mediana y la desviación estándar, los resultados son mostrados en la tabla 23.

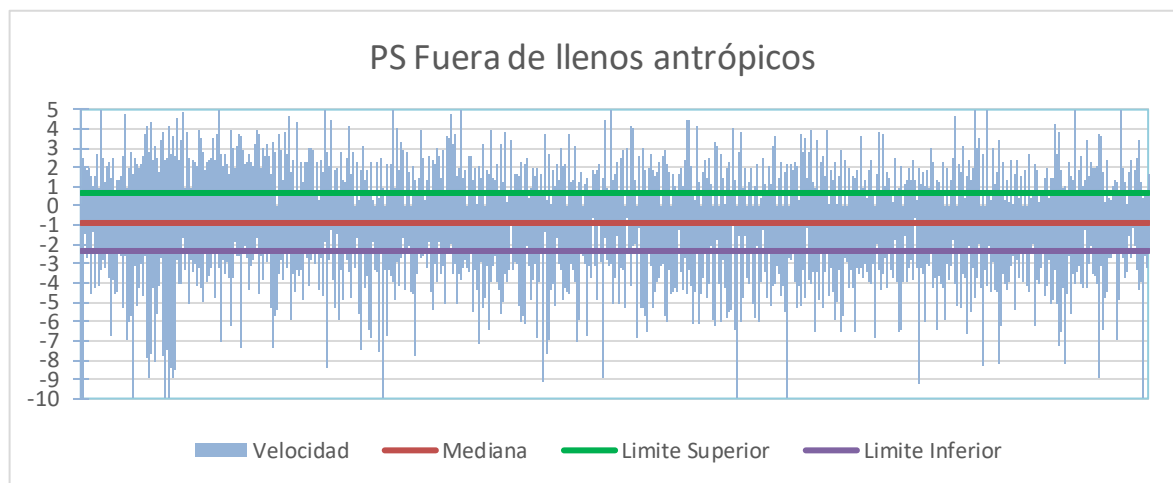
Tabla 23 Datos de velocidad mediana de PS fuera de llenos antrópicos

Conteo PS	15552
Mediana	-0,84
Desviación estándar	1,54

Fuente: Elaboración propia

Se graficaron los 15552 PS en función de la velocidad de desplazamiento vertical y la mediana de esta, para evidenciar gráficamente dichos resultados, estos se muestran en la figura 29.

Figura 29 Gráfico de velocidad mediana de PS fuera de llenos antrópicos



Fuente: Elaboración propia

Se evidenció que, en los 2 casos, la velocidad de desplazamiento vertical en mm/año del conjunto de PS sobre llenos antrópicos y el conjunto de PS fuera de llenos antrópicos, existe diferencia de la medida de posición central mediana, siendo mayor la velocidad en las zonas que corresponden a llenos antrópicos en -1.34 mm/año frente a las zonas fuera de llenos en -0.84 mm/año.

Para comprobar los datos en las mismas proporciones se realizaron pruebas con 2530 PS aleatorios que correspondieran a las zonas fuera de llenos antrópicos, la selección de los PS aleatorios se realizó con la función *Extracción aleatoria* del programa QGIS, los resultados de estas pruebas se realizaron

con *Group Stats* el cual es un complemento del programa QGIS que facilita el cálculo de estadísticas para grupos de características en una capa vectorial, en este caso, la capa de PS fuera de llenos antrópicos, los resultados se evidencian en la tabla 24.

Tabla 24 Pruebas de PS aleatorios fuera de llenos antrópicos

Fuera de llenos aleatorio 1		
Count PS	Mediana	Desviación estándar
2530	-0,87	1,540
Fuera de llenos aleatorio 2		
Count PS	Mediana	Desviación estándar
2530	-0.85	1,512
Fuera de llenos aleatorio 3		
Count PS	Mediana	Desviación estándar
2530	-0,85	1,564
Fuera de llenos aleatorio 4		
Count PS	Mediana	Desviación estándar
2530	-0,81	1,542

Fuente: Elaboración propia

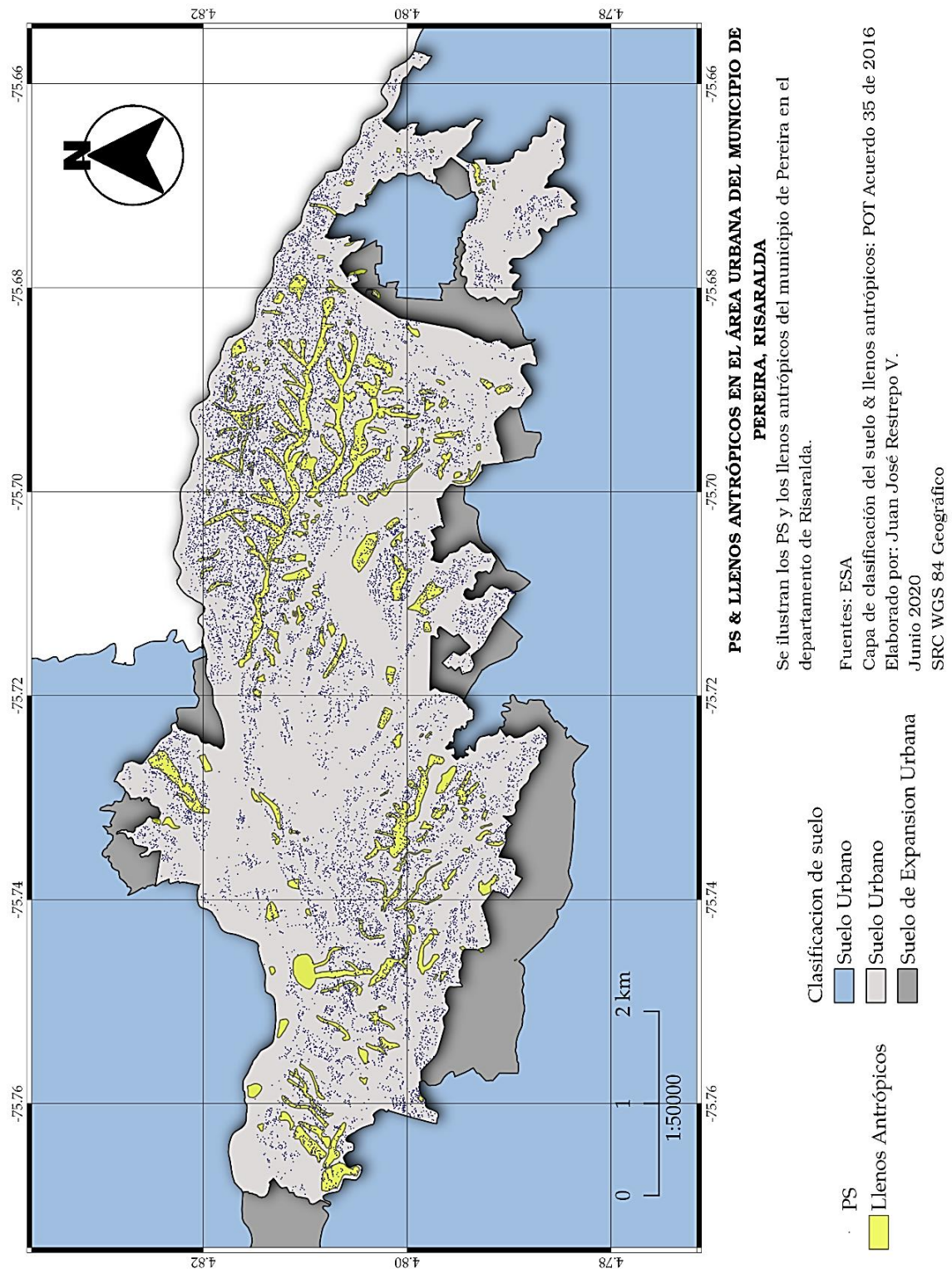
Según los resultados de las pruebas de PS aleatorios en la misma proporción frente a los PS presentes en zonas de llenos antrópicos, los resultados guardan las proporciones frente a los resultados de la medida de posición mediana.

Según los resultados obtenidos se puede decir que, la velocidad mediana de desplazamiento vertical en mm/año del conjunto de datos que se encuentran sobre llenos antrópicos es mayor que la velocidad mediana de desplazamiento vertical en mm/año del conjunto de datos que se encuentran fuera de llenos antrópicos.

Los suelos de llenos antrópicos son suelos que, por sus propiedades físicas de compactación, la heterogeneidad del material utilizado originadas por la intervención del hombre, modificando la morfología del terreno para la utilización de este en el área de construcción, obras de ingeniería, disposición de desechos, entre otros, hacen que estas zonas hayan sido objeto de análisis debido a la alteración de la superficie y sean zonas propensas del fenómeno de subsidencia.

Para el análisis de los valores de la velocidad de desplazamiento de los PS (*Persistent Scatterer*) que están sobre los llenos antrópicos del área urbana del municipio de Pereira en el departamento de Risaralda se realizó un mapa para evidenciar la presencia de estos, como se observa en la figura 30.

Figura 30 Mapa de PS & llenos antrópicos



Fuente: Elaboración propia

5.8 Estrategia de adaptación de zonas de subsidencia en PMGRD de Pereira

Para el aprovechamiento de los resultados las zonas de subsidencia y tener aplicabilidad en la administración territorial se propuso una estrategia para incluir dichas zonas en un instrumento de planificación en el cual legalmente tenga una utilidad para el desarrollo territorial del municipio de Pereira en el departamento de Risaralda.

Teniendo en cuenta la importancia del conocimiento del territorio, las zonas de subsidencia en el área urbana del municipio aparecen como una amenaza natural o antrópica según su tipología, este fenómeno conlleva a que la población expuesta esté vulnerable y se configure el riesgo el cual podría tener un impacto significativo si se llegara a materializar como un evento asociado con la capacidad de superar la resiliencia de la sociedad impactada.

Si un evento asociado al fenómeno de subsidencia llegara a tener un elevado impacto sobre la población expuesta, este podría llegar a catalogarse como un desastre, es por esto por lo que se convierte en un tema de responsabilidad de las autoridades y habitantes, al ser este fenómeno con una incertidumbre alta, dada por la velocidad en la que se desarrolla la subsidencia es relativamente lenta en comparación con otros fenómenos, puede llegar a pasar desapercibida.

Gracias a las imágenes satelitales de radar es posible medir el desplazamiento de la superficie del terreno con la técnica de interferometría diferencial, para el área urbana del municipio de Pereira en el departamento de Risaralda se calculó el desplazamiento de este en un periodo de 4 años (2016-2020), en este cálculo se evidencian puntos en donde cada uno cuenta con información de velocidad de desplazamiento en milímetros por año (mm/año), dichos puntos fueron validados con información de campo con eventos que han sucedido en el territorio y han sido organizados en un mapa.

Atendiendo los requerimientos plasmados en el informe de la Dirección de Gestión del Riesgo (DIGER) titulado "Prioridades de la gestión del riesgo de desastres del municipio de Pereira" del año 2019, donde señalan explícito "Identificar y caracterizar zonas de riesgo por subsidencia en el área urbana."

Se precisa que, según la ley 1523 de 2012 en su ARTÍCULO 3o. PRINCIPIOS GENERALES. se apliquen los siguientes:

1. Principio de protección: los residentes en Colombia deben ser protegidos por las autoridades en su vida e integridad física y mental, en sus bienes y en sus derechos colectivos a la seguridad, la tranquilidad y la salubridad públicas y a gozar de un ambiente sano, frente a posibles desastres o fenómenos peligrosos que amenacen o infieran daño a los valores enunciados.
2. El principio de precaución: Cuando exista la posibilidad de daños graves o irreversibles a las vidas, a los bienes y derechos de las personas, a las instituciones y a los ecosistemas como resultado de la materialización del riesgo en desastre, las autoridades y los particulares aplicarán el principio de precaución en virtud del cual la falta de certeza científica absoluta no será óbice para adoptar medidas encaminadas a prevenir, mitigar la situación de riesgo.
3. Principio del interés público o social: En toda situación de riesgo o de desastre, el interés público o social prevalecerá sobre el interés particular. Los intereses locales, regionales, sectoriales y colectivos cederán frente al interés nacional, sin detrimento de los derechos fundamentales del individuo y, sin demérito, de la autonomía de las entidades territoriales.

Se integre en el Plan Municipal de Gestión de Riesgo de desastres de Pereira (PMGRD) la categorización de los puntos antes mencionados con la información de desplazamiento vertical de la superficie del suelo plasmado en un mapa, como un elemento estructurante para el conocimiento del riesgo del municipio que a su vez aporta en los procesos de reducción del riesgo y de manejo de desastres.

Esto con el fin de que la administración municipal logre una mejor gestión frente a las amenazas que son ineludibles del territorio como el fenómeno de subsidencia partiendo desde el conocimiento de esta.

6. Discusión de resultados

6.1 Análisis de preprocesamiento de imágenes SAR

Las 25 imágenes SAR de los satélites en órbita Sentinel 1 & Sentinel 2, adquiridas entre los años 2016 – 2020, en formato *Single Look Complex* (SLC) con polarización Vertical Vertical (VV) y adquiridas de la forma *Interferometric Wide Swath Mode* (IW), obtenidas desde la infraestructura de *Copernicus Space* de la Agencia Espacial Europea (ESA) quienes disponen dichas imágenes de forma gratuita, completa y de acceso abierto, fueron adquiridas para el desarrollo de la investigación.

Estas imágenes SAR fueron alistadas y preparadas precisando los datos de posicionamiento del recorrido de los satélites que corresponden a la fecha del paso de cada uno por la zona de estudio, de forma en que se actualizan los datos predichos del satélite con los que vienen originalmente las imágenes y sustituidos por los datos precisos de órbita.

Se eligió la banda *Swath IW3* a la cual corresponde el área urbana del municipio de Pereira en el departamento de Risaralda, y se seleccionó la polarización VV, la cual el total de imágenes seleccionadas contaban con ella.

Se eligió la imagen más antigua como imagen maestra, la cual corresponde a la fecha del día 07 de enero de 2016, la imagen maestra sirvió para la generación de los interferogramas con un orden cronológico.

Se seleccionó el *Digital Elevation Model* (DEM) *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) proyecto internacional liderado por la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA) y la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA), dicho DEM sirvió como la base de georreferenciación y posicionamiento de las imágenes SAR.

El corregistro de las imágenes se llevó a cabo mediante el uso del DEM SRTM para que entre las imágenes SAR hubiera una coincidencia píxel a píxel en la superposición de imágenes y así poder calcular la coherencia de la señal de amplitud retrodispersada del total de imágenes, el corregistro permitió la visualización de dichos valores y refleja la coherencia relativa, se observó que en las zonas con abundante vegetación los valores de coherencia son bajos, mientras en las zonas con presencia de edificaciones los valores son altos.

La remoción de la fase topográfica se realizó en función de los cambios de fase en la topografía del área, en la fase topográfica existen los valores de fase que corresponde a la curvatura de la tierra o grandes cambios en la topografía, los cuales pueden ser confundidos con los valores de diferencia de fase obtenidos al final del proceso.

Debido a que la adquisición de las imágenes SAR se hacen en diferentes fechas, la señal emitida por el radar se ve afectada por las condiciones de la atmósfera, condiciones de temperatura, humedad y presión atmosférica, se hizo necesario la corrección de la fase atmosférica mediante la selección de los puntos esparcidos (*Sparse Points*) con los parámetros de amplitud estable con límite en los valores 0.65 como el menor valor, se utilizó la triangulación de Delaunay entre dichos puntos esparcidos, se calcularon las conexiones entre los puntos esparcidos y se calcularon las tendencias lineales de la fase atmosférica, estimada de -5 hasta 5 (mm/año) y una altura estimada de -20 hasta 20, (metros), estos valores se eligieron con respecto a la zona en específico y que se ajustaran lo mejor posible para poder finalmente utilizar las alturas residuales y recuperar el retraso de la fase atmosférica y obtener las imágenes de retardo troposférico, estas fueron usadas para ser restadas de los interferogramas usando con el método de los residuos invertidos de altura.

Se generaron los interferogramas mediante la multiplicación cruzada píxel por píxel de la imagen maestra con el conjugado complejo píxel por píxel de cada imagen esclava, multiplicando la amplitud de imagen maestra por imagen esclava y la fase interferométrica se representó como la diferencia de fase entre imágenes.

Los 24 interferogramas generados permitieron visibilizar las zonas donde de acuerdo con los valores hay una diferencia de fase similar, dichos valores expresan cambios de altura entre la imagen maestra con cada imagen esclava.

Gráficamente los interferogramas están representados por una rampa de color y de acuerdo con esto mostraron las variaciones de la altura de la superficie del terreno en zonas que corresponden a un color respecto a los valores de las diferencias de fase similares.

Para mejorar los resultados de los interferogramas y homogenizar los datos de la diferencia de fase de cada interferograma se aplicó el filtro *Goldstein* con un tamaño de ventana de $15 * 15$ píxeles, este filtro adaptativo redujo el ruido “sal y pimienta” *Spekle* en las zonas con una coherencia mayores a 0.5 para mejorar la precisión de la diferencia de fase.

6.2 Análisis de procesamiento de imágenes SAR

Se calcularon los dispersores permanentes (PS) en interferometría los cuales son aquellos que tienen valores altos de coherencia y que corresponderían a los objetos reflectantes que no tienen grandes cambios en el valor de amplitud, las zonas con una amplitud baja corresponderían a objetos como, agua, vegetación, excavaciones o grandes cambios en la altura de la superficie, que alteren los valores en una gran proporción.

De acuerdo con el histograma de coherencia en amplitud se determinó que los valores mayores o iguales a 0.6 o 60% en valor de coherencia como un valor aceptado en el que se encuentra el conjunto de dispersores permanentes como objetos estables y aptos para el análisis.

Con los datos de los píxeles con valores mayores a 0.6 en coherencia se obtuvieron un total de 30049 PS que corresponden al tamaño total del área de las imágenes SAR utilizadas en el área de estudio.

Se calculó la velocidad de desplazamiento de los dispersores permanentes (PS) desde los valores de la diferencia de fase, para la estimación de la altura residual se eligió el punto estable llamado punto de control en tierra, el cual es un punto sin cambios de altura en la línea de visión del satélite (LOS), el punto elegido correspondió a la zona del aeropuerto con coordenadas en Latitud 4.814655 y Longitud -75.739323, cuyo valor de coherencia entre imágenes es relativamente alto y valores de amplitud estable en todas las imágenes SAR.

Los parámetros de proceso de estimación de la velocidad que se utilizaron fueron de una tendencia lineal estimada de -10 hasta 5 (mm/año) y una altura estimada de -10 hasta 20 (metros).

Cada PS en el área total de estudio cuenta con la información de los cambios de altura con respecto al punto de control en tierra, de acuerdo con el total de interferogramas y las fechas de su adquisición, con estos valores se calculó los valores de velocidad en mm/año.

Se procedió a seleccionar los dispersores permanentes (PS) con los datos de velocidad, mediante el uso del perímetro urbano escritos en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) Acuerdo 35 de 2016, con la norma específica del suelo, como máscara específica del área concreta de estudio quedando un total de 18082 PS representados por puntos.

Estos dispersores permanentes en interferometría (PSI) del área urbana del municipio de Pereira en el departamento de Risaralda cumplen con las condiciones adecuadas según el área de estudio, dichos

puntos brindan la información necesaria para tener los datos de velocidades de desplazamiento y las distancias que han tenido cambios en el tiempo, sin embargo 25 imágenes en un periodo de 4 años 2016 - 2020 pueden llegar a ser pocas para tener tendencias lineales más cercanas a la realidad de los resultados, de las tendencias lineales depende los cálculos de las diferencias de altura que hay de un interferograma con respecto a otro, sin embargo para efectos prácticos y poder desarrollar el ejercicio de decidió ejecutar el modelo con esta cantidad ya que entre más imágenes más poder de procesamiento y capacidad de almacenaje son exigidos.

6.3 Análisis de posprocesamiento de imágenes SAR

La validación de los valores de velocidad y distancia acumulada de los dispersores permanentes en interferometría se realizó de 2 maneras, partiendo del hecho que no se contaba con algún estudio de subsidencia y datos tomados en algún punto del terreno para corroborar la información y resultados obtenidos, se determinaron dos métodos para comparar velocidades y se verifica que los datos obtenidos del proceso estuvieran acordes a la realidad de los procesos y fenómenos del área analizada, que los valores finales obtenidos reflejen de manera adecuada los efectos de eventos registrados en las zonas y sean coherentes frente a estos.

El primer método consistió en la búsqueda de eventos registrados en una fuente oficial, en este caso la sala de prensa de la alcaldía municipal de Pereira en el departamento de Risaralda, entre el mismo periodo de tiempo en el que se contaba con imágenes SAR, en este caso entre los años 2016 – 2020, que correspondieran a eventos que estuvieran asociados al fenómeno de subsidencia, tales como hundimientos o daños estructurales en vías o viviendas, movimientos en masa y acordes a la naturaleza del fenómeno.

Se encontraron 5 registros que corresponden a eventos atribuibles al fenómeno de subsidencia, los cuales contaron con dispersores permanentes (PS) y podían ser analizados por poder brindar información, se analizaron las velocidades de desplazamiento que fueran negativas en todos los casos y que corresponden a hundimientos, además se analizó que en cada fecha próxima a cada evento había una alteración en los valores de desplazamiento.

El segundo método consistió en el aprovechamiento de la red de monitoreo de laderas y taludes que está en funcionamiento por la Dirección de Gestión del Riesgo de Pereira (DIGER), dichas estaciones se encuentran en constante monitoreo y sobre zonas en las cuales el terreno es inestable,

esto significa que están sobre zonas con movimiento constante y podrían llegar a tener un fenómeno de remoción en masa.

Se georreferenciaron las 8 estaciones con las que cuenta la red de monitoreo de laderas y taludes inestables y se analizaron los datos de dispersores permanentes (PS) más cercanos a estos, en este caso un 85% de los casos analizados (6 de 7), se encuentra la relación que hay entre el desplazamiento vertical negativo de los PS próximos a las estaciones de monitoreo de laderas y taludes.

Estos 2 métodos sirvieron para la corroboración de que los datos de cada dispersor permanente tuviera un valor cercano a la realidad del terreno del que corresponde cada uno.

Al comparar la coherencia de los datos de velocidad y desplazamiento acumulado de los dispersores permanentes (PS) con los eventos registrados en la sala de prensa de la alcaldía y los PS cercanos a las laderas y taludes inestables se procedió a la elaboración del mapa con los PS.

La generación del mapa de subsidencia se llevó a cabo con los valores de velocidad de desplazamiento vertical en mm/año de cada dispersor permanente (PS), se hizo el uso de la capa de clasificación de suelo, se re proyectaron las capas hacia el sistema geodésico de coordenadas geográficas WGS 84 para la localización de los elementos del mapa, utilizando una rampa de colores que indica de menor a mayor velocidad.

Este mapa resultante permitió la visualización de las zonas donde ocurre el fenómeno de subsidencia ya sea en alejamiento o acercamiento de cada PS en LOS del satélite, que se traduce en zonas donde la superficie del terreno ha tenido una tendencia al desplazamiento vertical con velocidad en mm/año representada en una escala de colores en el periodo de 4 años (2016-2020).

Los dispersores permanentes (PS) representados en el mapa equivalen a los pixeles con una coherencia mayor o igual al 60% en amplitud de la señal retrodispersada, y comparados en la superposición de la totalidad de interferogramas obtenidos con la técnica DInSAR, dichos pixeles son representados en puntos y cada uno brinda información sobre el cambio de altura.

7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

En función de los objetivos específicos, se cumplió el primer objetivo “Seleccionar y adaptar un modelo para la detección de subsidencia para las condiciones del área de estudio” en el cual, se adaptó y diseñó un modelo para la detección de las zonas de subsidencia del área urbana del municipio de Pereira en el departamento de Risaralda, este modelo compuesto por varias entradas que son propias del lugar, procesos generales de las imágenes de radar en formato SLC y una salida que es el producto terminado logró los resultados esperados de calcular las zonas de subsidencia del área estudiada mediante la interferometría diferencial DInSAR y la técnica PSI la cual aportó los PS (*Persistent Scatterer*).

Se cumplió el segundo objetivo específico “Ejecutar el modelo para la comparación de los interferogramas para el periodo comprendido entre 2016-2019 para el área de estudio”, en el cual, se procesaron 25 imágenes SAR, sabiendo que entre mayor cantidad de estas se utilicen, los datos resultantes serán más precisos, este fue un obstáculo en términos técnicos por los requerimientos tecnológicos para llevar a cabo dicho modelo como, una gran capacidad de almacenamiento, memoria y procesamiento computacional son requeridos para ajustar las tendencias lineares que existen entre cada grupo de imágenes analizadas, se procesaron y analizaron los pares interferométricos de las imágenes en un periodo de 4 años (2016-2020) y se generó una capa de puntos que representan los dispersores permanentes PS.

Se cumplió el tercer objetivo específico “Comprobar la aplicabilidad de los resultados del modelo mediante la corroboración con datos de campo”, teniendo en cuenta el análisis de la corroboración con datos de campo de los resultados obtenidos a partir de las imágenes de radar de los satélites Sentinel 1 del programa Copernicus de la ESA y los datos que hay registrados en la sala de prensa de la alcaldía del municipio de Pereira sobre eventos que se asocian al fenómeno de subsidencia, se encontró que hay coherencias de movimientos de la superficie del terreno, adicional los PS fueron validados con los valores de coherencia mayores o iguales a un 60%, los cuales son apropiados para garantizar que las diferencias en las alturas encontradas entre cada par de interferogramas no se lleguen a confundir con zonas en las cuales correspondan a movimientos de la superficie

intencionales como lo pueden ser, excavaciones, levantamiento de techos, crecimiento de la vegetación, entre otros.

En todos los casos se observó en los PS una velocidad de desplazamiento en mm/año negativo que indica que dicho punto tiene una tendencia en el tiempo de hundimiento, adicional se observó la distancia total de desplazamiento de cada PS en un periodo de 4 años (2016-2020) siendo esta también negativa.

Con el análisis de los PS y la red de monitoreo de laderas y taludes inestables de la DIGER y teniendo en cuenta las estaciones y los dispersores permanentes (PS) más cercanos a estas, se comprueba la velocidad de los PS siendo en el 85% de los casos una velocidad negativa, es decir, con tendencia al hundimiento y atribuible al fenómeno de subsidencia.

Se evidenció que la coherencia de las imágenes es menor en las zonas con cobertura vegetal y mayor en las zonas con presencia de construcciones urbanas esto se demuestra en la densidad de PS expuestos en el resultado. Si bien es cierto que en las zonas de baja coherencia se puede aproximar a las zonas de subsidencia en este trabajo con la técnica utilizada no es recomendado realizarlo.

Se cumplió el cuarto objetivo específico “Proponer una estrategia para incluir las zonas de amenaza por subsidencia en el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD) de Pereira, Risaralda” el cual, para efectos prácticos de la administración municipal se hace enriquecedor el conocimiento de su territorio, este en el campo de la gestión del riesgo las zonas de subsidencia son una información que aportaría a la mejor toma de decisiones desde realizar un monitoreo y conocer el comportamiento de la superficie del terreno antes de que un evento se presente, esto hace que el mapa de subsidencia se convierta en una herramienta donde se hace técnicamente previsible un evento futuro asociado al fenómeno de subsidencia.

Se analizó el comportamiento de los dispersores permanentes (PS) por cada comuna, se agruparon según correspondieran a cada una y de acuerdo con los valores tendenciales de desplazamiento vertical se encontró que, las comunas con tendencia al hundimiento son, Centro, Río Otún, Villavicencio, Oriente, San Nicolás, Boston, Universidad, El poblado, El Jardín, Villa Santana, Del Café, Ferrocarril, Batallón y Olímpica. La comuna que mostró mayor estabilidad comparado con el resto de las comunas es Aeropuerto. Las comunas que muestran tendencia de elevación son, El rocío, Consota, San Joaquín, Cuba, El Oso y Perla del Otún.

Se analizó el comportamiento de los dispersores permanentes (PS) por cada barrio, se agruparon según correspondieran a cada uno y de acuerdo con los valores tendenciales de desplazamiento vertical se elaboró un mapa en el cual se visualizan los valores por medio de una escala de colores.

Se analizó el comportamiento de los dispersores permanentes (PS) que se encuentran sobre zonas de llenos antrópicos, se agruparon de acuerdo con los coincidentes en zonas de llenos y se analizaron las tendencias de desplazamiento vertical frente a los PS agrupados que no coincidían a zonas de llenos antrópicos, se agruparon y se hicieron 4 pruebas aleatorias de PS en las mismas proporciones que las zonas que coincidían sobre llenos antrópicos y se evidenció que, en los 2 casos, la velocidad de desplazamiento vertical en mm/año del conjunto de PS sobre llenos antrópicos y el conjunto de PS fuera de llenos antrópicos, existe diferencia de la tendencia de desplazamiento vertical, siendo mayor la velocidad mediana en las zonas que corresponden a llenos antrópicos en -1.34 mm/año frente a las zonas fuera de llenos en -0.84 mm/año.

Se cumplió con el objetivo general de la investigación “Mejorar el conocimiento de la amenaza por fenómenos de subsidencia para el área urbana del municipio de Pereira” al momento de evidenciar las zonas donde se presenta el fenómeno de subsidencia por medio de un mapa, las cuales no se encuentran determinadas en ningún instrumento de planificación del territorio, donde ocurren los cambios de altura de la superficie del terreno y mostrando la velocidad del fenómeno físico que puede ser de origen natural, o antrópico.

Con el desarrollo de este trabajo se verifica la factibilidad del uso de imágenes satelitales de radar para el municipio de Pereira en el departamento de Risaralda, generando la posibilidad de trabajos a futuro con la técnica utilizada y la posibilidad de profundización en otras, para aprovechar las tecnologías que están a disposición de la población en general, beneficiando a las diferentes entidades territoriales del país, ya que por la cobertura total nacional de imágenes y la recurrencia de la toma de las mismas, se pueden implementar diferentes proyectos que impacten positivamente en el conocimiento del territorio.

7.2 Recomendaciones

Quedan como recomendaciones de este trabajo las siguientes:

1. Ejecutar el modelo con una mayor cantidad de imágenes, teniendo en cuenta que esto requiere equipos de alto rendimiento, para lograr resultados que permitan realizar un monitoreo en una escala temporal más corta.
2. Relacionar las zonas de subsidencia que se evidencian en los resultados del modelo con diferentes causas que den paso al fenómeno, zonas como, llenos antrópicos, con daños en la red de agua y/o alcantarillado, de riesgo por movimientos en masa y demás que esté influyeran o aceleren la subsidencia en el terreno.
3. Se hace necesario mínimo un (1) punto de control en tierra que se conozca su posición geográfica, estabilidad o movimiento donde se tengan datos recurrentemente en el tiempo, medidos con un sistema de GPS RTK para ejecutar el modelo y elegir el mejor punto de control validado en campo.
4. Viabilidad de la técnica para el estudio del fenómeno en el área urbana de Pereira, por esto se recomienda el uso de esta para la incorporación en el PMGRD del municipio de Pereira en el departamento de Risaralda, teniendo en cuenta las recomendaciones anteriores.
5. La implementación de los resultados obtenidos en la detección de las zonas de subsidencia en el área urbana del municipio de Pereira en el departamento de Risaralda teniendo en cuenta las implicaciones contempladas en los derechos colectivos y del ambiente en la constitución política de Colombia para el fortalecimiento de la seguridad colectiva de las personas.

8. Bibliografía

- Alcaldía de Pereira. (2018). Disponible en:
<http://www.pereira.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>.
Pereira.
- AyV. Ingeniería (2020). RED DE MONITOREO DE LADERAS Y TALUDES. DIGER -
ALCALDIA DE PEREIRA, Recuperado el 18 de junio de 2020, de
https://slidetrack.ayving.com/diger_per/
- Carvajal, A. (2008). Fenomeno de la subsidencia en mineria subterranea. Serena; Chile: Universidad
de la serena.
- Chuvieco, E. (1995). Fundamentos de teledetección espacial. Madrid, Alcalá, España: EDICIONES
RIALP S.A.
- Delgado, R. T. (2003). Técnicas de ingeniería cartográfica empleadas en el estudio de subsidencia y
movimientos de ladera: principales características y análisis comparativo. España:
Universidad de Alicante.
- Denniss, A. (1995). T. M. Lillesand, & R. W. Kiefer, 1994. Remote Sensing and Image
Interpretation, 3rd ed. Xvi.
- ESA. (2009). ¿Qué es la teledetección? Disponible en:
http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEMO1U3FEXF_2.html.
- ESA. (2007). The permanent scatterers technique. Land training Lecture D1L7.
- Ferreti, A. Monti-Guarnieri, A., Prati, C., & Rocca, F. (2007). InSAR Principles: Guidelines for SAR
Interferometry Processing and Interpretation. ESA.
- Goldstein, R. M., & Werner, C. L. (1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications.
Geophysical Research Letters, 25(21), 4035-4038. Disponible en:
<https://doi.org/10.1029/1998GL900033>.

- Hanssen, R.F. (2001). Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Kluwer Academic; Springer: Dordrecht, The Netherlands.
- Lavell, Allan. (1996). Degradación Ambiental, Riesgo y Desastre Urbano. Problemas y conceptos: hacia la definición de una agenda de investigación. En Ma. A. Fernández (Comp.). Ciudades en riesgo. LA RED-USAI. Lima.
- Lekner, John (1987). Theory of Reflection, of Electromagnetic and Particle Waves.
- Maini, Anil & Aagrawal, Varsha (2007). Satellite Technology. Principles and Applications. Wiley.
- Márquez, R. A. (2009). Universidad Nacional de San Juan. Recuperado el 05 de Marzo de 2020, de <ftp://ftp.unsj.edu.ar/agrimensura/Redes/Altimetria%20satelital.pdf>.
- Martínez Villar, J. (2005). Elaboración y Análisis de Imágenes Radar desde satélite: Monitorización de deformaciones del Terreno, Instituto de Geomática, Castelldefels, España.
- Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. Reviews of Geophysics, 36(4), 441-500. <https://doi.org/10.1029/97RG03139>.
- Narváez, Lizardo, Et Al. (2009). La Gestión del Riesgo de Desastres Un enfoque basado en procesos. Proyecto Apoyo a la Prevención de Desastres en la Comunidad Andina – PREDECAN. Lima, Perú. Disponible en: http://www.comunidadandina.org/predecan/doc/libros/procesos_ok.pdf.
- Pacheco, J. (2007). Propuestas del modelo de Subsistencia y generación de arietamientos, Tesis Doctoral. Queretaro: Universidad Nacional Autónoma de Querétaro, Centro de Geociencias.
- Platonov, Alexei.(2002). Aplicación de imágenes de satélite SAR, en los estudios de contaminación marina y de dinámica de las aguas en el mediterráneo noroccidental. En Centre de Supercomputación de Catalunya.
- Prokopovich. (1979). genetic clasification on land subsidence. Florida; New York: pensacola Beach

- QGIS Equipo de Desarrollo (2018). Sistema de Información Geográfica QGIS. Proyecto de Fundación Geoespacial de código abierto. <http://qgis.osgeo.org>
- Ramirez, E. (2017). Shuttle Radar Topography Mission "The Mission to Map the World". Obtenido de NASA Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology. Disponible en: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>.
- Roberto Tomás, G. H. (2009). Subsistencia De La Tierra. En Enseñanza De Las Ciencias De La Tierra, Vol 17 (págs. 295-302). Mexico.
- SARMAP. (2009). Synthetic Aperture Radar - Guidebook.
- SARPROZ. Daniele Perissin. (2019) The SAR PROcessing tool, www.sarproz.com
- Schowengerdt, R. (1997). Remote Sensing: Models and methods for image processing. Academic Press. Tucson, Arizona.
- Sillerico, E., Marchamalo, M., Rojas, J. G., & Martínez, R. (2010). La técnica DInSAR: bases y aplicación a la medición de subsidencias del terreno en la construcción. Informes de la Construcción, 62(519), 47-53. Disponible en: <https://doi.org/10.3989/ic.09.063>.
- Skolnik, M. I. (1990). RADAR HANDBOOK. Boston, Massachusetts: McGraw-Hill.
- Temba, P. (2000). Fundamentos da Fotogrametria. Brasil: Departamento de Cartografia. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).
- Tessitore, S. (2014). Application of DInSAR techniques to the monitoring of ground deformations. Barcelona: UNIVERSITAT POLIÈCNICA DE CATALUNYA.
- Vásquez, H. (2018). Degradación ambiental y riesgo de desastres: implicaciones en el ordenamiento territorial de la ciudad de Pereira. Pereira Universidad Tecnológica de Pereira.
- Wilches-Chaux, G. (1993). La vulnerabilidad global. Los desastres no son naturales, 11-44.
- Zhilin, Li., Zou, W., Ding, X., Chen, Y. and Liu, G. (2004). A Quantitative Measure for the Quality of INSAR Interferograms Based on Phase Differences”, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. 70, No. 10, (2004), pp. 1131–1137.